Grundlagenerarbeitung zur Produktionseinführung von Reverse Engineering im Werk 010 der Daimler-Benz AG

Diplomarbeit

an der



vorgelegt von Robert Landwehr

Gutachter: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H. Grabowski
Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) Stefan Michels
Dipl.-Ing. (FH) Jörg Pfeifle
Dipl.-Ing. Gunther Storz

Stuttgart, den 4. Mai 1998

Kurzfassung

Der Prozeßablauf der Konstruktion/Fertigung von Bauteilen und den dazugehörigen Werkzeugen wird größtenteils durchgehend von der CAD/CAM-Technik unterstützt. Aufgrund manuell ausgeführter Änderungen entsprechen die CAD-Modelle nicht den realen Objekten in der Produktion (Werkzeuge oder Bauteile).

Mit der Anwendung von Reverse Engineering, das heißt Digitalisieren der realen Bauteile oder deren Werkzeuge sowie Rückführen dieser Daten in die CAD-Welt, soll dieses Problem gelöst werden. Diese beiden Technologien (Digitalisieren und Flächenrückführen) werden vorgestellt und erläutert. Zum Thema Digitalisieren werden verschiedene am Markt angebotenen Systeme analysiert. Vier Programme zur Flächenrückführung werden vorgestellt und hinsichtlich der Anforderungen der Instandhaltung von Preßwerkzeugen überprüft.

Innerhalb dieser Arbeit werden die Teilaufgaben von Reverse Engineering beleuchtet und auf ihre Anwendbarkeit im Umfeld der Instandhaltung von Schnitt- und Preßwerkzeugen im Werk 010 der Daimler-Benz AG beurteilt. Hierzu war eine genaue Analyse des Planungs- und Entstehungsprozesses vom Bauteil notwendig, um die Anforderungen an die neue Technologie differenziert festlegen zu können. Desweiteren wurde in diesem Rahmen das Bauteilspektrum der Presserei für Achsteile analysiert.

Bei der Erläuterung von Reverse Engineering werden praktisch einsetzbare Vorgehensweisen aufgeführt, um an einer Freiformgeometrie, deren CAD-Beschreibung nicht vorliegt, Änderungen vorzunehmen.

Schlüsselworte

Reverse Engineering, Rev-Eng, Flächenrückführung, Surface Reconstruction, Digitalisieren, optisch, taktil, Surfacer, IntiSurf, IntiTEC, scancad, *BCT*, Prozeßkette, CAQ, CAD, CAM, Instandhaltung, Presserei

I. Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit wurde bei der Daimler-Benz AG, Werk Stuttgart-Untertürkheim, in der Zeit vom 3. November 1997 bis 30. April 1998 in der Abteilung Verfahrensentwicklung für Computerintegrierte Produktions- und Leittechnik (VEC) erstellt.

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei allen Mitarbeitern der Abteilungen VEC, VEM sowie den Mitarbeitern der Instandhaltung der PAC/Pre für die freundliche Unterstützung während der Forschung für die Diplomarbeit bedanken.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern bei der Daimler-Benz AG, Stefan Michels und Jörg Pfeiffle, die mir stets hilfreich zur Seite standen.

Beim Institut für Rechneranwendung und Konstruktion möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H. Grabowski und Dipl.-Ing. Gunther Storz bedanken, die mich von der wissenschaftlichen Seite aus betreuten.

II. Erklärung

Hiermit erkläre ich, daß ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und nur mit den aufgeführten Hilfsmitteln durchgeführt habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet.

.... Untertürkheim, den 28. April 1998

- Robert Landwehr –

III. Inhaltsverzeichnis

IV. Abkürzungsverzeichnis

ATOS	**A**dvanced **TO**pometric **S**ensor (optischer Sensor von GOM)
PMK	**P**roduktions**m**ittel**k**onstruktion
C^4	**C**AD/**C**AM **C**ompetence **C**enter, Gremium zur Koordinierung aller CAD/CAM relevanter Projekte und Systeme
CAx	**C**omputer **A**ided **x** (x = **D** / **M** / **E** / **T** / **Q** / **O**) **D**esign, **M**anufacturing, **E**ngineering, **T**est, **Q**uality Assurance, **O**ptimization
CCD	**C**harge **C**oupled **D**evice, (dt. ladungsgekoppeltes Bauelement)
CNC	**C**omputerized **N**umerical **C**ontrol
DAV	**D**aten **A**ustausch **V**ereinbarung
DB	**D**aimler-**B**enz AG
DBL	**D**aimler-**B**enz **L**iefervorschrift
MBN	**M**ercedes-**B**enz **N**orm (heißt noch so)
DNC	**D**irect **N**umerical **C**ontrol
EP	**E**ntwicklung **P**kw (Werk 019)
F4 / Ulm	**F**orschungsbereich in Ulm
FDM	**F**used **D**eposition **M**odelling (RP-Verfahren, schichtweises Auftragen von Thermoplasten)
GOM	**G**esellschaft für **O**ptische **M**eßtechnik (stellt optischen Sensor *ATOS* her)
GWB	**G**ieß**w**erkzeug**b**au
HSC	**H**igh **S**peed **C**utting (Fräsen mit sehr hoher Schnittgeschwindigkeit; bei Fräsen in Stahl: v_C=500 m/min bis 5000 m/min)
IGES	**I**nitial **G**raphics **E**xchange **S**pecification (übergeordnetes CAx-Datenaustauschformat, sogenannte *neutrale* Datenschnittstelle)
IUA	**I**nteractive **U**ser **A**ccess (Fortran-ähnliche Makrosprache für *CATIA*)
KMG	**K**oordinaten**m**eß**g**erät
NC	**N**umerical **C**ontrol
NC-IPS	2,5-D-NC-Programmiersystem im DB-Konzern
NURBS	**N**on **U**niform, **R**ational **B**-**S**plines
O-FTP	**O**dette **F**ile **T**ransfer **P**rotokoll (Protokoll, mit dem die Automobilindustrie Daten austauscht)
PAC	**P**roduktioncenter **Ac**hsen
PGK	**P**oint **G**eometrie **K**ernel (binäres Nativedatenformat von DigiMan)
PK	**P**rozeß**k**ette
PPA	**P**roduktions**p**lanung **A**chsen

PRE	**Pre**sserei der Daimler-Benz AG in Mettingen, Werk 010
QS	**Q**ualitäts**s**icherung
reen	**Re**verse **En**gineering (Arbeitskreis innerhalb der DB Forschung, hat aber nichts mit dem Projekt im Werk 010 zu tun)
RP	**R**apid-**P**rototyping, Verfahren zur schnellen Erzeugung von Bauteilen
SCG	**Sc**hmiede**G**esenkbau
SGC	**S**olid **G**round **C**uring (sehr schnelles und kostengünstiges RP-Verfahren)
STL	**ST**ereo**L**ithography
SWAN	**S**ystem zum **w**eltweiten **A**ustausch von **N**utzdaten (entwickelt von DB Sindelfingen)
VDA	**V**erband **d**er **A**utomobilindustrie e.V.
VDA FS	**V**erband **d**er **A**utomobilindustrie **F**lächen**s**chnittstelle
VE C	**V**erfahrens**E**ntwicklung **C**omputerintegrierte Steuerung- und Leittechnik; (Abteilung der DB AG im Werk 010)
VE M	DB-Abteilung: **V**erfahrens**e**ntwicklung **M**echanik (Mechanische Bearbeitung)
VOB	**Vorb**etriebe (*z. B.* Schmiede, Presserei, Gießerei)

V. Glossar

Euklid	*CAD Software im SCG bei DB von Strässle*
BCT	*BCT* GmbH aus Dortmund (sc. 1986); liefert in der Produktreihe *scancad* drei Programme:
Scancad scan & laser	Digitalisieren (taktil/Laser/CCD)
Scancad mill	Fräsprogramme
Scancad geo	Flächenrückführung
CCD	**C**harge **C**oupled **D**evice, ladungsgekoppeltes Bauelement. CCD-Sensoren werden heute als Fotozellen bei Scannern und digitalen Kameras eingesetzt. Sie können das eintreffende Licht in elektrische Signale unterschiedlicher Stärke umwandeln.
Coil	Rolle mit Rohblech; Ausgangsprodukt in der Presserei
COMET 100	Optischer Meßsensor von Firma Steinbichler
Cyclone	Taktiles Digitalisiergerät von Renishaw
DigiMan	Digitalisierungsmanager; Software zur Weiterverarbeitung großer Punktmengen
DNC-Rechner	Ein Rechner, an den umliegende CNC-Maschinen netzwerktechnisch angeschlossen sind. Auf diesem Rechner werden mit Hilfe von DNC-Software NC-relevante Daten verwaltet.
FIDIA	Italienischer Hersteller von HSC-Maschinen
Fliegender Sensor	Bauart eines optischen Sensors, der frei in der Hand gehalten werden kann und um das Objekt herum bewegt wird. Das Modell muß nicht gedreht werden.
Freiformfläche	Mathematisch nicht trivial beschreibbare Fläche; meist definiert durch NURBS, B-Splines oder Bézierkurven
Ganymed 97	Fliegendes, optisches Digitalisierungssystem vom Forschungsbereich 4 in Ulm; Nachfolger des *Ganymed* 5
Hybridmodell	DV-gestützte Geometriebeschreibung aus einer Mischung von Punktmengen, CAD-Flächen und/oder Solids (CAD-Körper)
ICEM DDN	CAD Software, die neben *CATIA* bei DB in der Konstruktion verwendet wird (= Design Drafting Numerical)
INITISURF	Software der Firma INTITEC zur Flächenrückführung
Nativedaten	Daten im speziellen Format der jeweils verwendeten Software
OptoForm	Zusammenschluß von Anwendern, Forschern und Entwicklern auf den Gebieten der optischen Meßtechnik und Datenauswertung im Daimler-Benz-Konzern
Optoshape	Optischer Sensor der Stiftung Steinbeis in Konstanz
Patch	Begrenzter Bereich einer Oberfläche, die eine Gesamtfläche beschreibt (Punkte oder Teilfläche)

Punktwolke	Menge von Punkten in einem dreidimensionalen, kartesischen Koordinatensystem; wird meist als ASCII-Format gespeichert
Rapid-Prototyping	schnelles Verfahren - im zeitlichen Sinne - zur Erzeugung von Bauteilen für jede Art Vorbeurteilung, üblicherweise auf der Basis von CAD-Daten
Regelgeometrien	Mathematisch trivial beschreibbare Geometrien wie Kreisfläche, Rechteck, Zylinder- oder Kegelmantel, sowie Zylinder, Kegel, Kugel, Quader, usw.
SCOLL	C-ähnliche Programmierschnittstelle von *Surfacer*
STEP	Neutrales Schnittstellenfomat, dient dem neutralen Austausch kompletter Produktdaten zwischen CAx-Systemen.
STL	Schnittstellen-Format zur Ansteuerung von Rapid-Prototyping-Verfahren (z.B. Stereo-Lithographie). Das STL-Format beschreibt eine 3D-Geometrie in Form von angenäherten Dreiecksfacetten.
Surfacer V8.0	aktuelle Software von der Firma *Imageware* (USA)
Toggeln	Verdrehung des Koordinatensystems im CAD-Raum
Trimmen	Nachträgliche Begrenzung einer bestehenden Fläche mit Randkurven
Triangulierung	Erzeugung von Oberflächennetzen aus endlich kleinen Dreiecks-flächen aus Punkt- oder Oberflächendaten
VDA 4914/2	VDA-Empfehlung zum Einsatz von OFTP (Odette File Transfer Protocol)
Werk 010	Werk der DB AG in Hedelfingen, Mettingen und teilweise in Untertürkheim, zur Herstellung von Aggregaten (Achsen, Motoren und Getriebe); Abkürzung: W010

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Im Werk 010 der Daimler-Benz AG in Stuttgart werden in den Bereichen der Vorbetriebe (VOB) Schmiede-, Guß- sowie Blechteile für Motoren, Getriebe und Achsen hergestellt.

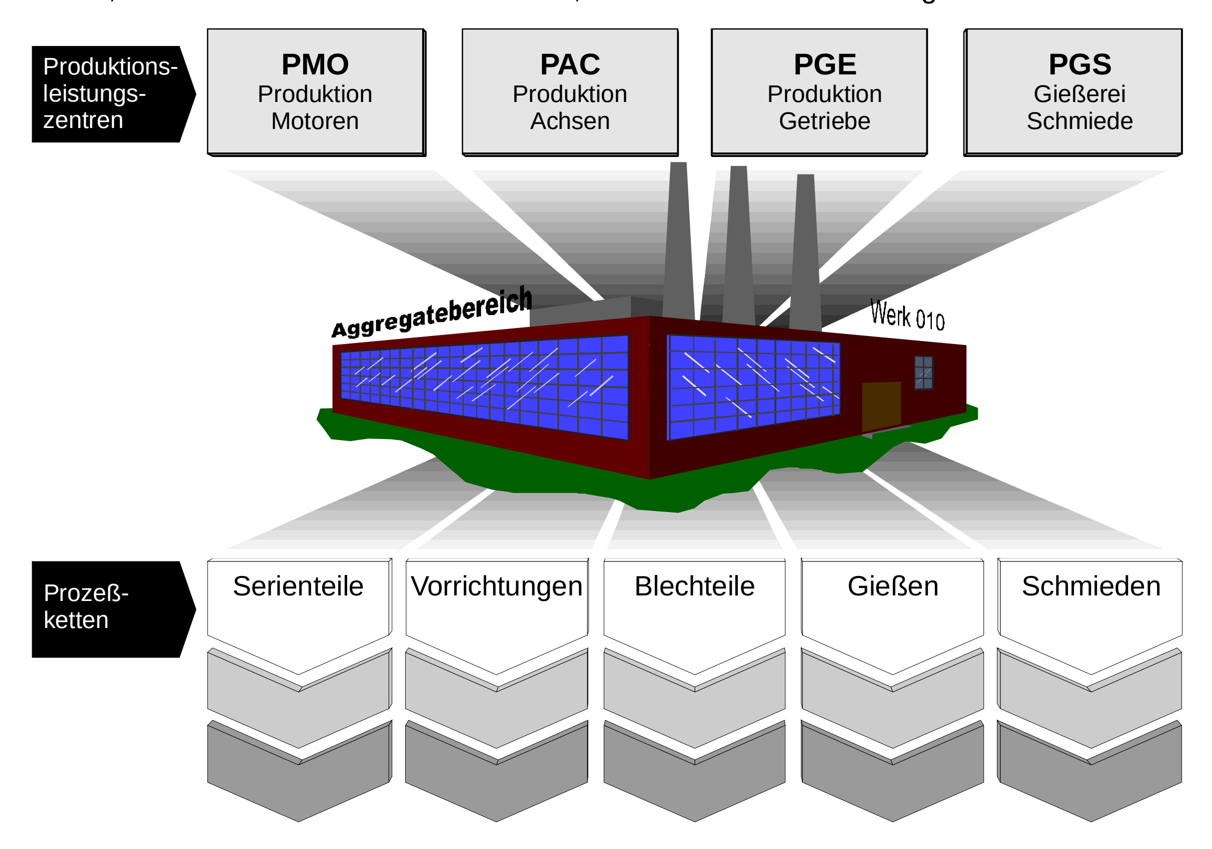


Abbildung 1-1: Heutige Produktionsleistungszentren und Hauptprozeßketten im Aggregatebereich (Werk 010) [Haa97]

Der Prozeßablauf der Konstruktion/Fertigung von Bauteilen und den dazugehörigen Werkzeugen wird von der CAD/CAM-Technik unterstützt. Innerhalb dieser Prozeßkette werden CAD-Datenmodelle erstellt beziehungsweise verändert und weitergegeben.

Während der Serienvorbereitung und innerhalb der Serienproduktion selbst werden fertigungsbedingte Änderungen am Werkzeug vorgenommen, um einen prozeßsichereren Verlauf der Produktion zu gewährleisten.

Desweiteren werden aufgrund von Weiterentwicklungen partielle Änderungen an den produzierten Roh-/Fertigteilen durchgeführt. Das bedeutet, daß die dazugehörigen Werkzeuge partiell geändert werden müssen. Diese Änderungen werden in den meisten Fällen von den Geometriedatenbeschreibungen der Werkzeuge nicht erfaßt.

Serienproduktionswerkzeuge müssen gewartet, gepflegt und im Falle eines technischen Versagens wieder instandgesetzt werden. Die Basis der Instandsetzung sind die Geometriedatenbeschreibungen (CAD-Modelle, Zeichnungen, Kopiermodelle) der Werkzeuge, die aus den oben genannten Gründen nicht aktuell sind.

1.2 Allgemeine Darstellung der Produktentstehung

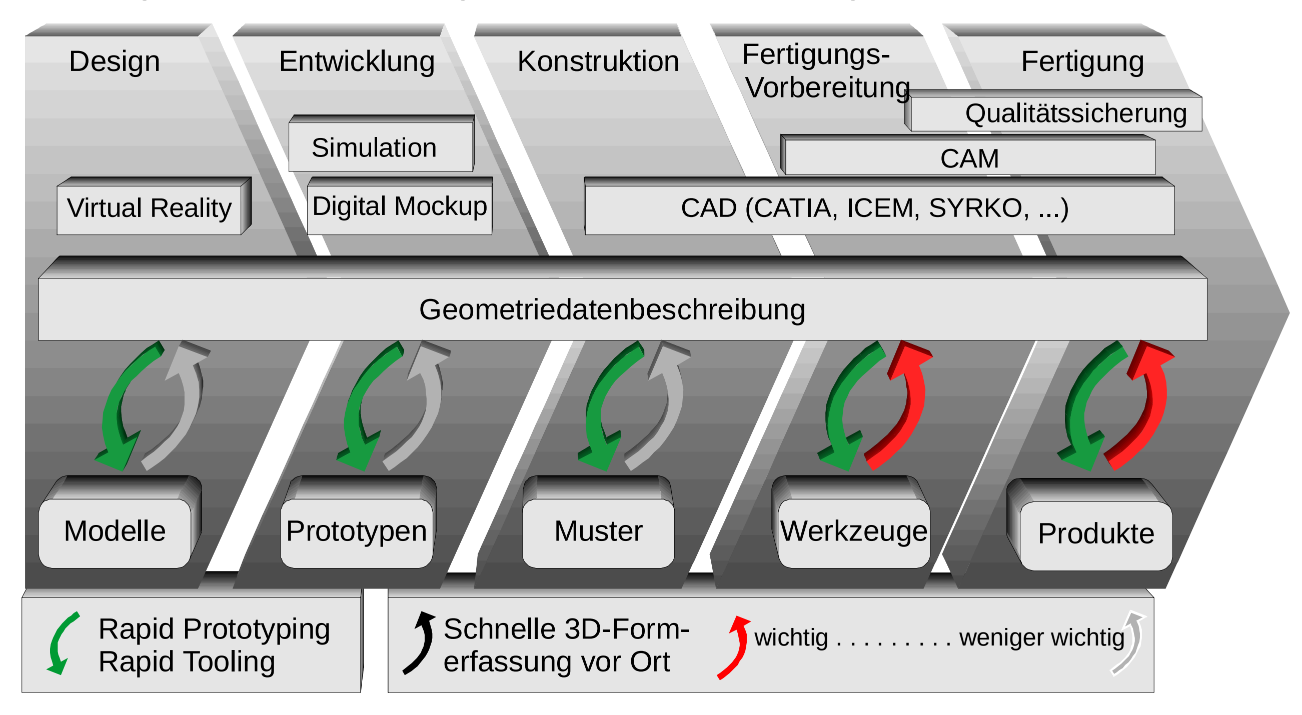


Abbildung 1-2: Prozeß der Produktentstehung [Mal97b]

Die gesamte Prozeßkette der Produktentstehung kann effizienter gestaltet werden, damit beispielsweise die *„Time-to-Market"* verkürzt wird und die Entwicklungskosten gesenkt werden [Bie97]. Dafür müssen Systeme zur schnellen 3D-Formerfassung in die einzelnen Iterationsprozesse der Gesamtprozeßkette integriert werden. Aus Abbildung 1-2 wird deutlich, daß in jeder Phase des gesamten Prozesses der Produktentstehung Geometriedatenbeschreibungen zu physischen Objekten verarbeitet werden und diese physischen Objekte wieder in CAD-Beschreibungen zurückgewandelt werden müssen.

Vor allem im Bereich der Werkzeuge und Produkte müssen aber auch zukünftig physische Objekte wieder zurück in CAD-Beschreibungen gewandelt werden. Zur Zeit der Diplomarbeit wird diese neue Technologie des Verarbeitens von physischen Objekten - Reverse Engineering - noch nicht angewendet.

In Zukunft soll im Bereich der Entwicklung und Konstruktion die Technologie *Digital Mockup* das Erstellen von Prototypen (physische Modelle) ersetzen. In den Bereichen Design, Entwicklung und Konstruktion werden weniger physische Modelle entstehen.

1.3 Aufgabenstellungen dieser Arbeit

Die Diplomarbeit wird im Umfeld des Projektes *„Einführung der CAD/CAM/CAQ-Technik in die Prozeßkette der Werkzeuginstandhaltung PAC/PRE im Werk 010 der Daimler-Benz AG"* erstellt. Das definierte Ziel des Projektes lautet: *„Ablauf einer CAx-unterstützten Instandhaltung von Schnitt- und Preßwerkzeugen zur Verkürzung der Durchlaufzeiten und Steigerung der Qualität"*.

Daraus ergibt sich das Projektziel, eine Vorauswahl der benötigten Systeme zu treffen. Diese Systeme sind beispielsweise ein Digitalisiersystem, Flächenrückführsystem, ein HSC-Fräszentrum und ein dafür geeignetes System zur NC-Generierung.

Aus der Aufgabenstellung des Gesamtprojekts resultieren unter anderem folgende Teilaufgaben, die im Rahmen dieser Diplomarbeit behandelt werden sollen:

1. Erfassen und Bewerten der zu reproduzierenden Freiformgeometrien von Ur- beziehungsweise Umformwerkzeugen und den entsprechenden Bauteilen im Werk 010 sowie das Erarbeiten einer aussagekräftigen Strukturierung der Geometrien (Freiformflächen) nach zu ermittelnden Parametern.
2. Aufnehmen beziehungsweise Erfassen der spezifischen Anforderungen (*z. B.* Genauigkeitsanforderungen, Konturdefinition, Zeitaufwand, etc.) sowie der Abläufe des Reverse Engineering (*z. B.* Weiterverwendung der Daten in der Fertigung, Änderungsumfänge, etc.) im Bereich PAC/PRE.
3. Am Beispiel eines externen Werkzeuglieferanten für Preßwerkzeuge soll exemplarisch die Einbindungsmöglichkeit externer Dokumentation von Werkzeugen in die Instandhaltung der Preß- und Schnittwerkzeuge genauer untersucht werden.
4. Untersuchen der CAQ-Technologien: Digitalisieren und Flächenrückführen. Bewerten der optischen und taktilen Verfahren zur Digitalisierung von Freiformflächen bezüglich der ermittelten Strukturierung und Parameter.
5. Überprüfung des Verfahrens der Flächenrückführung auf den grundsätzlichen Einsatz bezüglich Aufwand und Nutzen.
6. Bisherige Entwicklungen auf dem Markt analysieren und deren technische Bewertung hinsichtlich des Produktionseinsatzes sowie der Prozeßtauglichkeit (CAD/CAM-Prozeßkette) etc. durchführen.

2 Untersuchung des Ist-Zustandes

Der Ist-Zustand der Produktion im Werk 010 der Daimler-Benz AG läßt sich am einfachsten durch die einzelnen Prozeßketten beschreiben. Hierzu wurde eine Prozeßkettenanalyse durchgeführt.

2.1 Allgemeine Prozeßkette

Die allgemeine Prozeßkette beginnt bei der Entwicklung. Dort entsteht das Fertigteil nur als Geometriedatenbeschreibung. Und die Prozeßkette endet in der Produktion, in der die Teile gefertigt werden. Diese allgemeine Prozeßkette wird in Abbildung 2-1 auf die Abläufe im Aggregatebereich (Werk 010) abgebildet. Die Prozeßkette ist stark vereinfacht und Dokumentationen beziehungsweise Teile fließen sequentiell nur in eine Richtung. Man erkennt, daß die Produktionsbelange auf das Werk 010 beschränkt sind, und daß die Belange der Entwicklung nur im Werk 019 lokalisiert sind.

Das Werk 010 (Produktion) ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht ein Auftragnehmer des Werks 019 (Entwicklung). Die Daimler-Benz AG ist in seinen Werken modular aufgebaut. Wenn die Entwicklung eines Motors läuft, werden von den Werken, die hierfür in Frage kommen, Angebote eingeholt. Ein Auftrag zur Produktion eines Motors kann von der Entwicklung praktisch an jedes Werk vergeben werden, das hierfür ein Angebot vorlegt. Motoren werden beispielsweise an den Standorten Stuttgart, Berlin/Marienfeld und Friedrichshafen hergestellt.

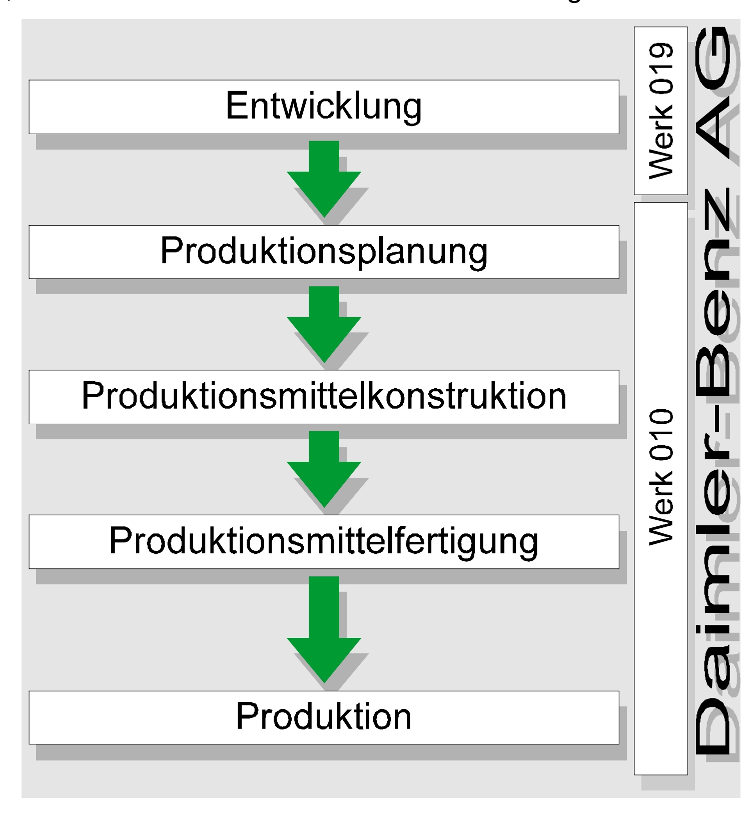


Abbildung 2-1: Allgemeine Prozeßkette im Werk 010 der Daimler-Benz AG

2.2 Prozeßketten im Aggregatebereich der Daimler-Benz AG

Die Prozesse im Werk 010 sind mannigfaltig und können noch detaillierter dargestellt werden:

Generell können im Werk 010 fünf verschiedene Prozeßketten unterschieden werden; vergleiche Abbildung 1-1. Ausgehend von der Produktentwicklung und -konstruktion (Werk 019) werden die einzelnen Prozeßketten innerhalb des Aggregatebereiches (Werk 010) mit 3D-CAD-Fertigteilbeschreibungen versorgt.

Je nach Prozeßkette im Werk 010 erfolgt nach der Beschreibung des Fertigteils durch die Produktkonstruktion in der Regel zunächst die Auslegung des Rohteils (vergleiche Abbildung 2-1 links). Der abschließende Schritt in der Phase der Produktionsmittelgestaltung besteht aus der Rohteilbeschreibung mit Hilfe prozeßkettenspezifischer CAD-Modelliersysteme, das heißt, auf der Grundlage der Rohteilbeschreibung werden die entsprechenden Betriebsmittel konstruiert.

Nach der Herstellung der Produktionsmittel werden die prozeßkettenspezifischen Rohteile durch Ur- oder Umfomen hergestellt. Während die Prozeßketten der Vorbetriebe: Schmieden, Gießen und Blechteile sämtliche beschriebenen Ablaufschritte enthalten, entfallen in den beiden Prozeßketten Serienteile und Vorrichtungen einige Folgen, vergleiche Abbildung 2-2.

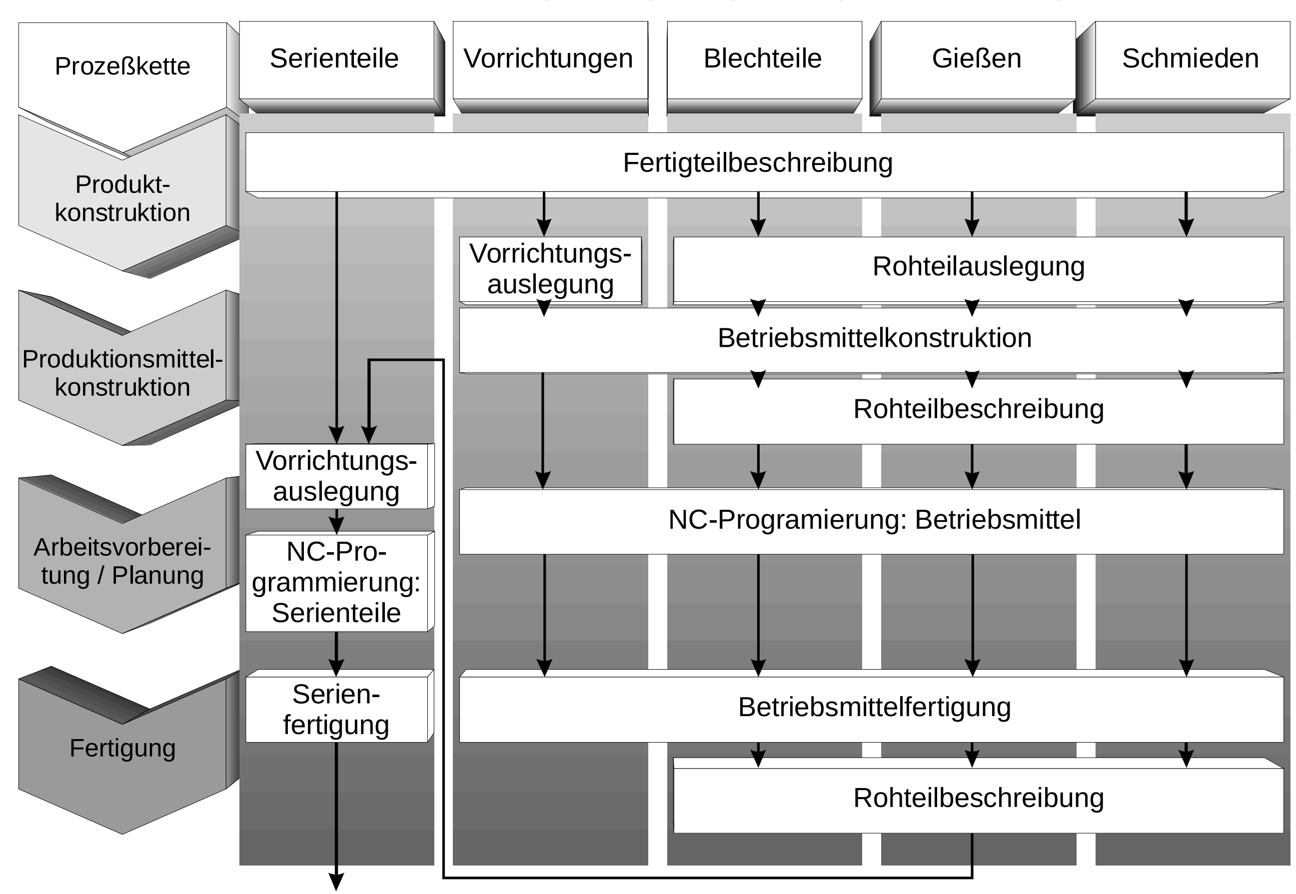


Abbildung 2-2: Abläufe innerhalb der Prozeßketten [Haa97]

Der Serienfertigungen sind Abteilungen angegliedert, die für die Wartung und Pflege der eingesetzten Betriebsmittel zuständig sind, die Instandhaltungen, vergleiche Abbildung 4-1 und Abbildung 5-8.

Die normale Prozeßkette sieht nicht vor, daß die tatsächlichen Geometriedaten aus der Serienteilfertigung zurück in die Entwicklung, Konstruktion oder Betriebsmittelplanung geleitet werden. Durch diesen nicht vorhandenen Informationsfluß fehlt der Konstruktionsabteilung der Entwicklung (Konstruktion/Entwicklung) die aktuelle Geometrie des zu fertigenden Bauteils, und der Konstruktion der Betriebsmittel fehlt die Information über die Geometrie des Werkzeuges.

2.3 Die Prozeßkette Blechteile

Im folgenden soll eine einzelne Prozeßkette am Beispiel der Prozeßkette Blechteile im Werk 010 noch genauer beleuchtet werden. Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, gelangen die Geometriedatenbeschreibungen der Bauteile aus dem Werk 019 ins Werk 010 (Aggregatebau) und funkieren dort als Grundlage für die Produktionsplanung.

Die Produktionsplanung setzt sich mit der allgemeinen Planung der Herstellung eines Fertigteils auseinander. Das Produktionsszenario wird entworfen. Für die erforderlichen Betriebsmittel, die beschafft oder hergestellt werden müssen, holt die Produktionsplanung von internen und externen Lieferanten Angebote ein. Die Produktion kann erst nach der Freigabe eines Werkzeugs beginnen, hierzu mehr in Kapitel 4.1 und 4.2.

2.4 Allgemeines über die Produktion Achsen [Sax98]

Das Produktionscenter Achsen (PAC) im Werk 010 der Daimler-Benz AG in Stuttgart hat zur Zeit 3.491 Mitarbeiter. 1997 wurden in Hedelfingen 693.000 Hinterachsen und 686.000 Vorderachspaare produziert. Die PAC ist Lieferant von vormontierten Achsen und Achsteilen für die Pkw-Werke in Sindelfingen, Bremen, Raststatt und Hambach.

Eine Achse ist eine Konstruktion, die überwiegend aus Blechteilen besteht. Eine Hinterachse besteht beispielsweise aus über 250 Teilen, wobei die Hauptbestandteile von der PAC selbst produziert werden. Eine Vorderachse ist dagegen weniger aufwendig zu bauen – hier werden wertmäßig 75% der Teile zugekauft.

3 Bauteilspektrum

3.1 Begriffsdefinition

Neben den Begriffen, die im Glossar kurz erläutert beziehungsweise definiert werden, gilt es, zwei wichtige Bezeichnung an dieser Stelle vorab für den Rahmen dieser Diplomarbeit einheitlich zu definieren. Diese Begriffe sind „*Fertigteil*“ beziehungsweise „*Rohteil*“ und das jeweilige fertigungsspezifisch abgeleitete „*Werkzeug*“, das das Rohteil während des Fertigungsprozesses bearbeitet. In der technischen Terminologie werden diese beiden Begriffe wie folgt definiert:

Ein **Rohteil** ist ein mit fertigungstechnischen Mitteln zu veränderndes physische Objekt. Es beinhaltet die Bearbeitungszugaben, die fertigungsbedingt notwendig sind.

Ein **Fertigteil** ist ein spanabhebend (Bohren, Fräsen, Drehen, Schleifen, Hohnen usw.) bearbeitetes Rohteil.

Werkzeuge sind Fertigungsmittel, die durch Relativbewegungen gegenüber dem Rohteil unter Energieübertragung die Bildung oder Änderung seiner Form und Lage, bisweilen auch seiner Stoffeigenschaften, bewirken. [Czi96]

Rohteil und Werkzeug bilden zusammen ein Wirkpaar. Die Relativbewegungen zwischen Rohteil und Werkzeug nennt man auch Wirkbewegungen. Wirkbewegungen setzen sich aus den Komponenten Schnittbewegung, Zustellbewegung und Vorschubbewegung zusammen. Je nach Fertigungsverfahren sind sie translatorisch oder rotatorisch, stetig oder unstetig. [BeGr97]

Im Bereich der Planung ist ein Fertigteil oder ein Rohteil meist nur als CAD-Beschreibung vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit werden solche Geometriedaten-Beschreibungen der Bauteils als *„CAD-Modell des Roh-/Fertigteils“* bezeichnet. Von diesem CAD-Modell des Rohteils wird unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten das *„CAD-Modell des Werkzeuges“* abgeleitet, vergleiche Abbildung 3-1.

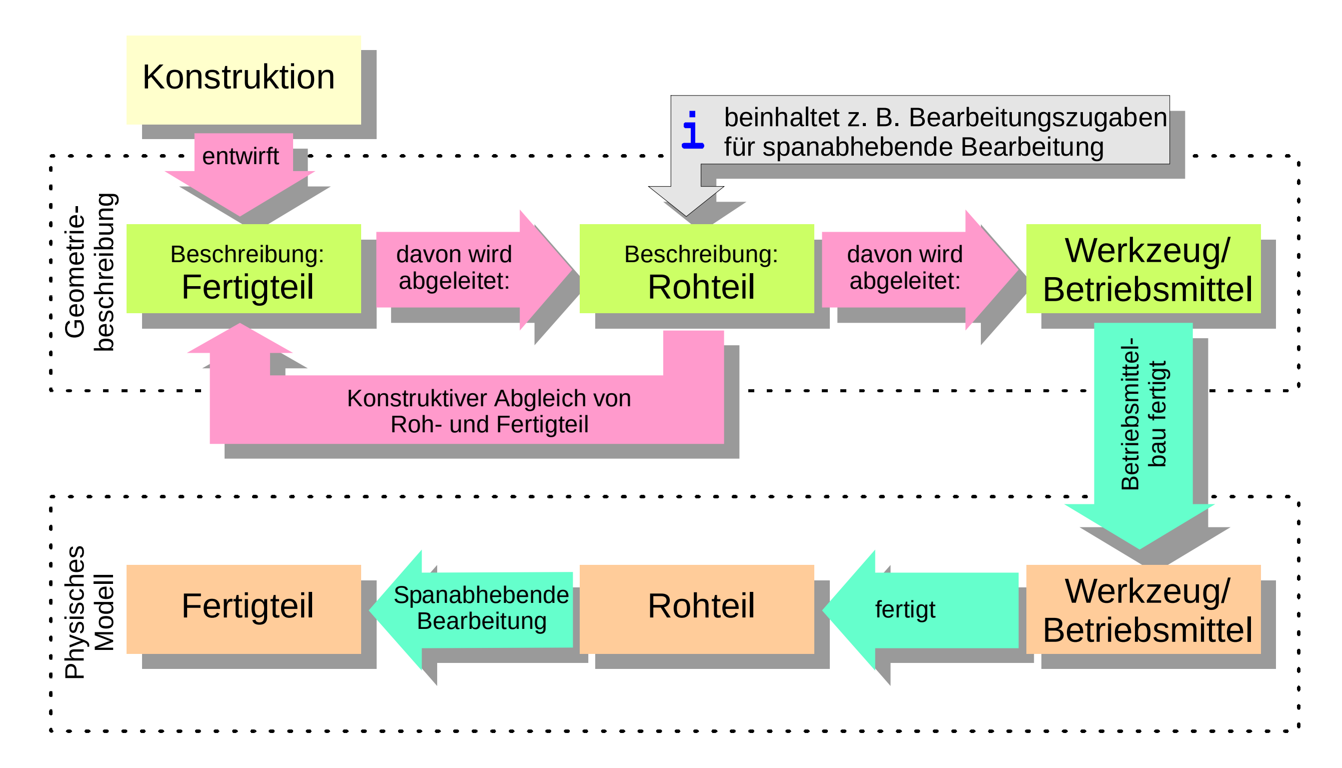


Abbildung 3-1: CAD- und physische Modelle des Roh-/Fertigteils und des Werkzeuges

Die Ur- und Umformprozesse des Gießens und des Schmiedens fertigen ein *Rohteil*, das auf beliebige Art weiter bearbeitet oder mit anderen Fertigteilen verbunden (montiert, verschraubt oder verschweißt) werden kann. Da Blechteile nicht mehr weiter mechanisch bearbeitet werden, spricht man in der Presserei nur von Fertigteilen. Diese werden im Falle von Achsteilen meistens durch Schweißen stoffschlüssig mit anderen Fertigteilen verbunden.

Da im Anschluß an die Presserei die Blechteile meist direkt zu Baugruppen weiterverarbeitet werden, spricht man hier von den **Fertigteilen**. An das Abpressen der Bauteile schließt sich nur selten ein spanabhebendes Bearbeitungsverfahren an. In einigen Fällen werden Blechbauteile entgratet, eben geschliffen oder eine Bohrung wird nachträglich auf Passung bearbeitet. In diesen Fällen entsteht in der Presse das Rohteil. In der spanabhebenden Berarbeitung entsteht das Fertigteil.

Bauteile können aber auch kleine Baugruppen bezeichnen. Ein Seitenteil besteht beispielsweise aus der Oberschale, der Unterschale sowie den Lagerböcken für Zug- und Sturzstrebe. Komplett zusammengeschweißt bezeichnet man diese Baugruppe als das Bauteil: Seitenteil (links oder rechts).

3.2 Bauteilspektrum des Werkes 010

Im Werk 010, das sich auf Untertürkheim, Hedelfingen und Mettingen ausdehnt, werden Motoren, Getriebe und Achsen für Mercedes-Benz-Pkw hergestellt Für die Produktion verfügt das Werk über Fertigungsanlagen zum Ur- und Umformen, als auch zur spanenden Serienbearbeitung. Hierzu gibt es die Prozeßketten der Vorbetriebe, vergleiche Kapitel 2.2.

Da die Technologie „Reverse Engineering“ zuerst in die Prozeßkette der Blechbearbeitung im Werk 010 eingeführt werden soll, wurde die Analyse der des Bauteilspektrums auf die Blechteile beschränkt. Bauteile aus Blech werden in der Automobilindustrie hauptsächlich für die Achsen und die Karosserie eines Pkws benötigt. Außerdem werden in der Produktion Achsen/Presserei

(PAC/Pre) im Werk 010 Blechteile für Getriebe- und Motoren hergestellt, *z. B.* die Lamellenträger für die automatischen Getriebe oder auch Kleinteile aus Blech für die Fertigung von Motoren.

3.3 Bauteilspektrum im Produktionscenter Achsen/ Blechteile

In der Instandhaltung der Presserei werden alle Werkzeuge zur Fertigung von Bauteilen aus Blech und die dazugehörigen Prüfwerkzeuge gewartet. Unter Blechbearbeitung fallen Umformen von Blech im allgemeinen, das gradfreie Feinstanzen und das Platinenschneiden oder auch Stanzen genannt. Oftmals werden an einem Rohteil innerhalb mehrerer Werkzeugoperationen eine Vielzahl dieser Bearbeitungsarten durchgeführt. Solche Werkzeuge werden als Verbundwerkzeuge bezeichnet, da die verschiedenen Blechbearbeitungen im Verbund stattfinden.

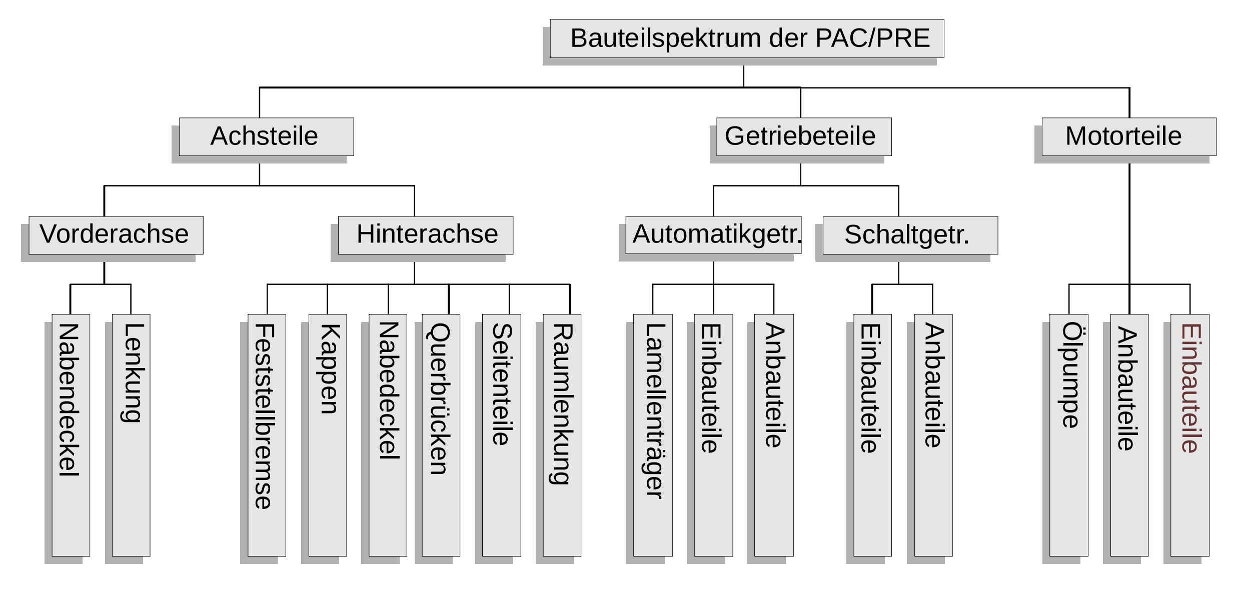


Abbildung 3-2: Bauteilspektrum in der PAC/Presserei

Aus der Abbildung 3-2 geht hervor, daß ein Großteil der Bauteile aus der Abteilung PAC/Pre für die Montage von Pkw-Achsen benötigt werden. Aus diesem Grund wird auf den folgenden Seiten der Aufbau einer typischen Vorder- und einer Hinterachse jeweils exemplarisch erläutert.

3.3.1 Hinterachse

Zu einer Raumlenker-Hinterachse eines Mercedes-Benz-Pkw gehören:

- Seitenteil, links und rechts, jeweils Unterteil und Oberteil. Man spricht auch von der Unter- und der Oberschale, genaueres in Kapitel 3.4.4.
- Querbrücke, vorne und hinten, je nach Fahrzeugtyp mit Ober- und Unterteil, genaueres in Kapitel 3.4.3
- Zug-, Schub- und Sturzstrebe, genaueres in Kapitel 3.4.5
- Federlenker, links und rechts, mit Oberteil und Unterteil (In Abbildung 3-3 nicht zu sehen.)
- und noch einige kleinere Anschweiß- und Anbauteile, *z. B.* vier Lagerböcke

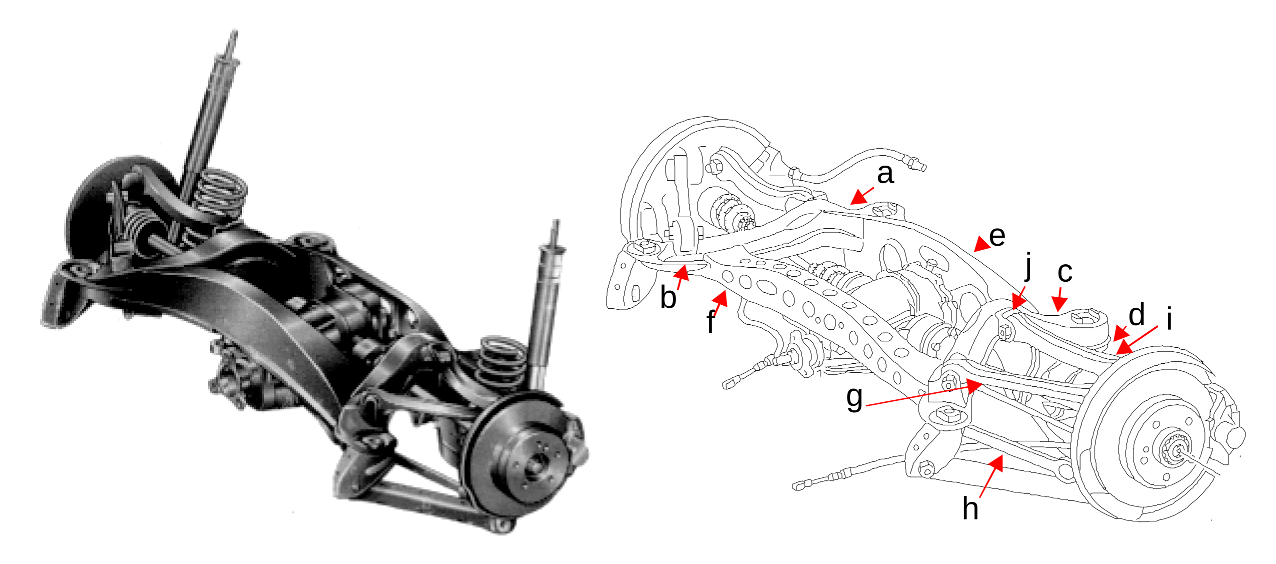


Abbildung 3-3: Raumlenkerhinterachse eines Mercedes-Benz-Pkw

a	Oberschale Seitenteil rechts	f	Querbrücke vorn (zweiteilig)
b	Unterschale Seitenteil rechts	g	Zugstrebe
c	Oberschale Seitenteil links	h	Schubstrebe
d	Unterschale Seitenteil links	i	Sturzstrebe
e	Querbrücke hinten	j	Lagerbock (ein beliebiger)

Tabelle 3-1: Beschriftung von Abbildung 3-3

Nicht zu sehen ist beispielsweise die Hinterachsverlängerung, die beiden Nabenkappen, die Lagerabdeckungen (links und rechts jeweils innen/außen) und einige andere kleine Blecheibauteile der Feststellbremse.

3.3.2 Vorderachse

Zu einem Vorderachspaar gehören je nach Fahrzeugtyp hauptsächlich folgende Blechbauteile:

- Unterer Querlenker, links und rechts, jeweils Unterschale und Oberschale (vergleiche Abbildung 3-4)
- Oberer Querlenker, links und rechts (vergleiche Abbildung 3-4)

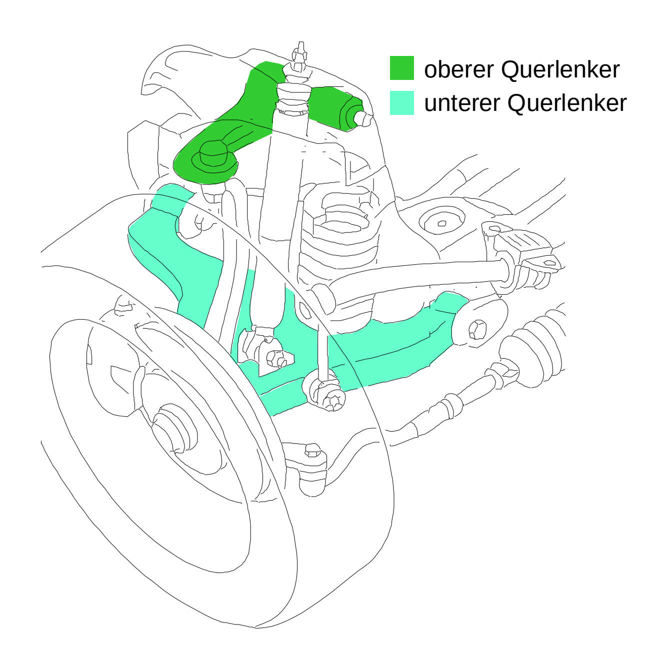


Abbildung 3-4: Vorderachse (links) eines Mercedes-Benz-Pkw mit doppelter Querlenkung



Abbildung 3-5: Einzelbauteile: Querlenker Unterteil links (Oberschale/Unterschale)

Der untere Querlenker ist aus fünf Bauteilen stoffschlüssig zusammengefügt. Die Blechanteile sind die Oberschale und die Unterschale, wie sie in der Abbildung 3-5 gezeigt werden. Diese werden von einem Schweißautomaten Stoß-an-Stoß geschweißt.



Abbildung 3-6: Querlenker Unterteil links (1. Montageschritt: Schweißen von Ober-/Unterschale)

3.4 Genauere Beschreibung einzelner Zusammenbauten

Innerhalb der Daimler-Benz AG wird oft von einem *Zusammenbau* gesprochen, wenn der technische Begriff *Baugruppe* gemeint ist. Im folgenden sollen die Baugruppen, in denen Blechbauteile vorkommen (vergleiche Abbildung 3-2), genauer aufgeschlüsselt werden.

3.4.1 Querlenker

Die Vorderachslenkung eines Mercedes-Benz-Pkw folgt dem Prinzip der Querlenkung. Ein starrer Querlenker bildet hierbei das Lenkdreieck, das an den beiden Lenkeckpunkten elastisch aufgehängt ist. Um die Kräfte besser zu verteilen und abstützen zu können, wird hier ein doppelter Querlenker eingesetzt. Ein solcher Lenkaufbau besteht aus einem **Querlenker-Oberteil** und dem **Querlenker-Unterteil**. Das Unterteil nimmt den größeren Teil der Lenkkräfte auf [Reim95] und ist aus zwei Blechschalen aufgebaut. Das Oberteil besteht nur aus einer Schale. Demnach ist der Querlenker aus den folgenden einzelnen Blechbauteilen zusammengebaut:

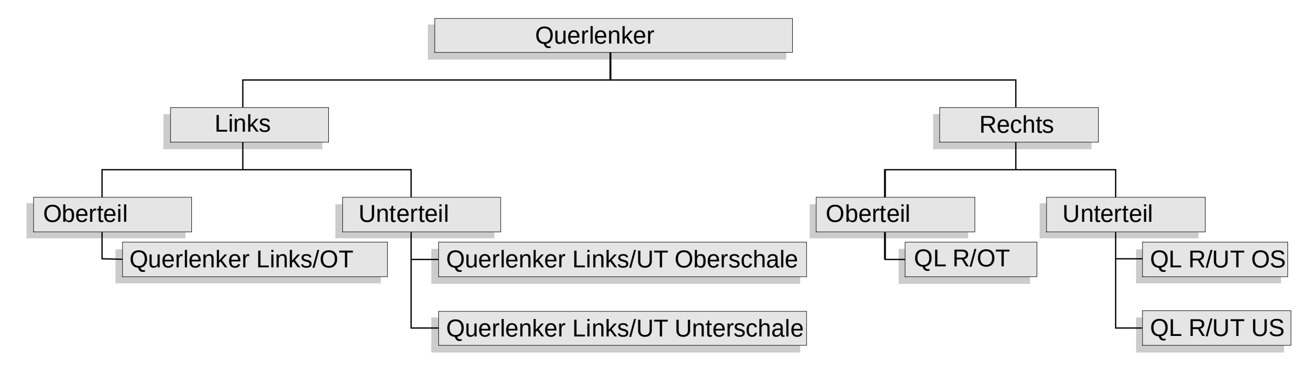


Abbildung 3-7: Blechbauteile der Baugruppe Querlenker

In der Abbildung 3-7 sind nur die Blechbauteile berücksichtigt. Beim Querlenker des Mercedes-Benz-Transporters wird noch zusätzlich das Blechbauteil **Abdeckplatte** oder auch **Konsole** auf den Hohlraum (vergleiche Abbildung 3-6) der Oberschale des Querlenker-Unterteils aufgeschweißt. Zu einem montierfähigen Querlenker gehören auch verschiedene Normteile aus Elastomer zur elastischen Aufhängung des Lenkers, ein Schmiedeteil und diverse Halbzeuge aus Blech, *z. B.* zwei Rohrstücke.

3.4.2 Feststellbremse

Die Feststellbremse wirkt bei einem Mercedes-Benz-Pkw auf die Hinterachse. Diese Trommelbremse, die mit dem Fuß betätigt wird, sitzt direkt neben der Scheibenbremse nach innen versetzt.

Folgende Blechteile werden an dieser Bremse verbaut: eine **Zuglasche**, zwei spiegelbildliche **Drucklaschen**, ein **Bremsbackenband** und zwei verschiedene **Bremsbackenstege**.

3.4.3 Querbrücken

Im allgemeinen besteht die Hinterachse eines Mercedes-Benz-Pkws aus einer vorderen und einer hinteren **Querbrücke**. Die Ausnahme ist das Modell A-Klasse (interne Modellbezeichnung: A168). Wegen der Längslenkerhinterachse fehlen hier einige Bauteile, die sonst charakteristisch für die Hinterachse eines Pkws von Mercedes-Benz ausmachen. Das Seitenteil besteht nur aus einer Schale (Blechstärke 3,5 mm), und nur eine Querbrücke verbindet die beiden Seitenteile.

Diese Querbrücke wird aus einem Halbzeug (Rohr) durch Kaltumformen hergestellt. Alle anderen aktuellen Mercedes-Benz-Pkws verfügen über eine Raumlenkerhinterachse.

Die vordere Querbrücke besteht aus einer Oberschale und einer Unterschale, die miteinander verschweißt werden. Die hintere Querbrücke besteht nur aus einem Bauteil und einer mittig eingeschweißten Platine zur Verstärkung, vergleiche Abbildung 3-3. An der hinteren Querbrücke wird das Differentialgetriebe angegracht.

3.4.4 Seitenteile

Seitenteile werden von der vorderen und der hinteren Querbrücke verbunden. Sie setzten sich paarweise aus einer **Oberschale** und einer **Unterschale** (links und rechts) zusammen. Zusätzlich trägt jedes Seitenteil angeschweißte Lagerböcke für die Streben der Raumlenkerhinterachse (Ausnahme: A-Klasse, vergleiche Kapitel 3.4.3). Nach dem Zusammenschweißen der Oberschale und Unterschale des Seitenteils, werden die **Lagerböcke** für die Sturzstrebe und Schubstrebe werden jeweils an die Oberschale des Seitenteils geschweißt,. An die Unterschale des Seitenteils schließt sich der Lagerbock für die Sturzstrebe kraftschlüssig an.

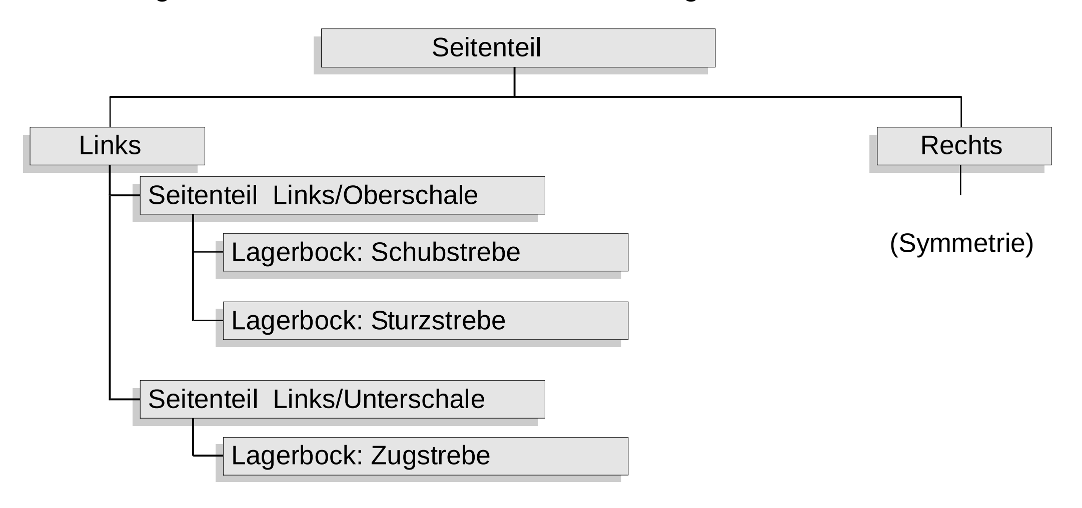


Abbildung 3-8: Aufbau von Seitenteil (links und rechts)

3.4.5 Raumlenkung

Die Raumlenkung wird durch einen geschmiedeten Radträger realisiert, der an den Blechbauteilen **Zug-, Schub und Sturzstrebe** aufgehängt ist (vergleiche Abbildung 3-3, rechts) und somit Anfahr- und Bremsmoment aufnehmen kann. Zur Herstellung der Streben vergleiche Kapitel 3.7.

Parallel zu Zugstrebe befindet sich das Bauteil: **Federlenker** (vergleiche Abbildung 5-3). Der Federlenker trägt des Feder-Dämpfer-Paar und koppelt Radträger und Karosserie.

3.4.6 Einzelbauteile des automatischen Getriebes

Die Blechbauteile der verschiedenen automatischen Getriebe, die in Hedelfingen montiert werden, sind hauptsächlich Bauteile zum Einbau, also Bauteile, die direkte, mechanische Aufgaben erfüllen sollen. Für das Planetengetriebe im automatischen Getriebe werden die Blechbauteile **Planetenträger** und **Hohlradträger** benötigt.

Für die vier bis fünf Lamellenkupplungen (je nach Bauart) im automatischen Getriebe, werden in der PAC/Pre Blechbauteile zur radialen Fixierung der Lamellen hergestellt. **Außen- und Innenlamellenträger** sind sehr komplexe Blechbauteile, die zum Teil in über zwanzig Werkzeugoperationen entstehen. Die Lamellenkontur an den Trägern wird durch axiales „Rollen" gefertigt, eine dem Walzen verwandte Fertigungstechnik. Um die notwendige Vorspannkraft an den Lamellenkupplungen zu realisieren, werden axial wirkende Federn montiert. Diese Axialfedern werden vom Blechbauteil **Federteller** radial fixiert.

Die **Lamellen** selbst sind reine 2D-Blechbauteile (Platinenschnitt). Die Daimler-Benz AG bezieht alle Sorten von Lamellen von externen Herstellern. Die Lamellen werden mit dem aufgeklebten Kupplungsbelag geliefert.

Die Kraftübertragung zwischen den einzelnen Kupplungen und Drehzahlwandlungen im automatischen Getriebe wird über mehrere **Flansche** aus Blech bewerkstelligt, die auch in der PAC/Pre produziert werden.

In der Parkstellung der Automatik rastet die **Sperrklinke** an einem Innenlamellenträger ein und verriegelt somit den gesamten Antriebsstrang. Die **Ölwanne** aus Blech unter der elekrohydraulischen Steuerung des Getriebes dichtet das Getriebegehäuse nach unten ab.

3.4.7 Einzelbauteile des schaltbaren Getriebes

Im Schaltgetriebe eines Mercedes-Benz-Pkw kommen nur zwei Blechbauteile zum Einsatz: Der **Verriegelungshebel** und die **Schalthebel** sitzen außen am Gehäuse des Getriebes.

3.4.8 Ölpumpe und Anlasser

Die Ölpumpe und der Anlasser sind Unterbaugruppen des Motors. In der PAC/Pre wird das **Kettenrad** zum Antrieb der Ölpumpe als Feinschneidteil produziert. Im Anlasser kommen mehrere einfache **Scheiben** und **Mitnehmerscheiben** zum Einsatz, sowie die beiden Bauteile **Ring Anlaßzahnkranz** und **Segmentring.**

3.4.9 Sonstige Bauteile des Motors

Jeder Motor in einem Mercedes-Benz-Pkw verfügt über angeschraubte **Aufhänge-** und **Umbauösen** aus Blech. An diesen Ösen wird der Motor bei der Demontage aus dem Motorraum gehoben.

Im Motor selbst werden an der Kurbelwelle **Ausgleichsgewichte** aus Blech befestigt. Am Kraftstoffverteiler werden Kraftstoffleitungen mit zwei **Haltern** und eine **Klemme** aus Blech verbaut.

Weitere Bauteile aus Blech sind unterschiedliche **Mitnehmerscheiben** und das **Anschlußstück** an der Einspritzung.

3.5 Unterscheidungsmerkmale von Bauteilen

Alle Bauteile, die in der PAC/Pre gefertigt werden, können anhand bestimmter Kriterien in Gruppen unterteilt werden. Die Anforderungen an die Genauigkeit können innerhalb der Merkmale eines Bauteils sehr stark differieren. So werden manche Bauteilkanten, denen bei der Montage eine bestimmte Funktion zukommt, sehr genau toleriert, dagegen werden Durchstellungen für Stifte oder Schrauben in der Lage und Größe nur sehr grob toleriert

(vergleiche hierzu Kapitel 4.2 und 4.3. An vielen Stellen des Bauteils gilt die mittlere Allgemeintoleranz nach DIN 6930m, diese Toleranz gibt für die Schnittkanten des Bauteils die Toleranz an.

Alle Blechbauteile, die in der Presserei hergestellt werden, lassen sich nach ihrem Verwendungszweck ordnen, je nach dem, ob sie für die Hinter- oder Vorderachse, das Getriebe oder den Motor eines Pkws benötigt werden.

Die gefertigten Bauteile lassen sich auch nach ihren fertigungstechnischen Eigenschaften wie Größe, Umformungsgrad, Werkstoff, Blechdicke, etc. unterscheiden. Doch alle diese Unterscheidungsmerkmale eignen sich nicht für eine Klassifizierung aus der Sicht des Projekts für die Einführung von Reverse Engineering in die Instandhaltung.

Aus der Sicht der Instandhaltung ist es wichtig, relativ umfassende Informationen über die Genauigkeitsanforderungen zu erhalten. Beim Digitalisieren kann viel effizienter vorgegangen werden, wenn die Genauigkeitsanforderungen in allen Bereichen des zu erfassenden Objekts bekannt sind.

Die einzigen Bauteile, die in struktureller Ausprägung zusammengefaßt werden können, sind Querlenker (Oberteil und Unterteil), Streben, Federlenker, Seitenteile, Querbrücken und Lamellenträger. Davon eignen sich einige Bauteile wiederum nur bedingt, da sie zwischen den einzelnen Modellen zu wenig Gemeinsamkeiten haben. Als Beispiel hierfür ist die Längslenkerhinterachse des Modells A168 (A-Klasse) abgebildet.

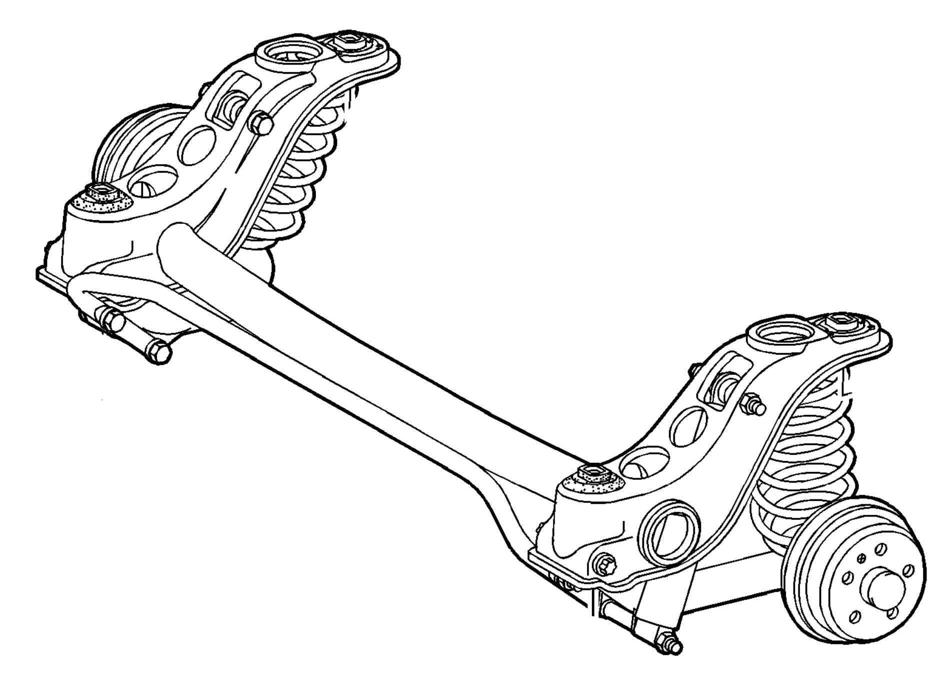


Abbildung 3-9: Längslenkerhinterachse des Modells A168 (A-Klasse)

In der Abbildung 3-9 erkennt man deutlich, daß die Längslenkerhinterachse nur eine Querbrücke hat. Die Seitenteile sind einschalig und haben keine strukturelle Ähnlichkeit mit Seitenteilen Seitenteilen anderer Mercedes-Benz-Pkws. Streben, Hinterachsverlängerungen und Federlenker kommen hier nicht vor. Die Achseteile der A-Klasse (Vorder- und Hinterachse) können nicht mit den korrespondierenden Bauteilen anderer Modelle verglichen werden. Sie werden deswegen in der Ähnlichkeitsanlyse nicht mit erfaßt.

Die oben genannten Bauteile sind in Ihrem Aufbau und ihrer Struktur jeweils zusammenfaßbar. Angaben über die Blechdicke oder die Werkstoffe bei der Ähnlichkeitsanalyse können nicht gemacht werden, da diese Parameter zwischen den unterschiedlichen Modellen stark streuen.

Viele Blechbauteile werden in neun Stufen hergestellt, da die gängigsten Pressen auf neun Stufen ausgelegt sind und den Platinenschnitt beinhalten. Aber nicht alle Werkzeuge, die auf neun Stufen verteilt sind, haben neun Operationen, in denen das Werkstück in der Form verändert wird. Stufen können leer sein oder eine 180°-Wendung des Werkstücks ausführen. Leere Stufen sind über das Werkzeug gleichmäßig verteilt, um die Presse nicht asymmetrisch zu belasten.

Gängige Preßoperationen sind Platineschneiden, Grundformen, Vorziehen, Weiterziehen, Fertigziehen, Lochen, Nachschlagen, Prägen, Rollen, Beschneiden, Rest-Beschneiden, Durchstellen, Schneiden. Je nach Art, Umfang und Größe der Operation sind die Preßwerkzeuge mehr oder weniger segmentiert. Im allgemeinen kann festgestellt werden, daß der Trend bei neueren Werkzeugen zur feineren Segmentierung geht. Werkzeugbereiche, die versagen, können dadurch einfach partiell ersetzt werden. Im Instandsetzungsfall eines unsegmentierten Werkzeugs, das lokale Schädigungen an der Oberflächen aufweist, wird das Werkzeug an der geschädigten Stelle segmentiert. Ein Einsatz für den wiederherzustellenden Bereich wird hergestellt. Solche Einsätze können für Umformwerkzeuge (Biegestempel, Biegematrize), aber auch für Schnittwerkzeuge (Schnittstempel, Schnittmatrize) gefertigt werden.

3.5.1 Querlenker Oberteil

Das Querlenker Oberteil wird immer paarweise (links und rechts) hergestellt. Erst in den letzten beiden Operationen werden die Zwillingsbauteile auseinandergeschnitten. Das einzelne Bauteil hat ein Bauvolumen von 250x120x80 mm^3. Weil immer Zwillingsteile produziert werden, muß mit der doppelten Länge gerechnet werden: 500mm.

3.5.2 Querlenker Unterteil

Dieses Bauteil besteht aus einer Oberschale und einer Unterschale. Beide Schalen sind einander recht ähnlich (vergleiche Abbildung 3-5). Die Ziehtiefe der beiden eher flachen Bauteile liegt bei 30 bis 40 mm. Exemplarisch für alle anderen Bauteile dieses Typs sei an dieser Stelle erwähnt, daß das Querlenkerunterteil des A901 in 8 Stufen hergestellt wird, von denen alle mit Preßoperationen belegt sind.

3.5.3 Seitenteil

Seitenteile sind wie Querbrücken auch zwischen den Modellen in Form, Größe und Ziehtiefe durchaus vergleichbar. Seitenteile sind die größten Blechbauteile an der Achse eines Mercedes-Benz-Pkw. Das Seitenteil des Modells A210 wird in neun Operationen hergestellt (incl. Platinenschneiden). Das Seitenteil eines A220 kann von einem Quader 800x400x300 mm^3 umschrieben werden. Die lokale Ziehtiefe einer einzelnen Schale überschreitet an keiner Stelle den Wert 80 mm.

3.5.4 Querbrücken (vorne und hinten)

Die zweischalig aufgebaute, vordere Querbrücke ist kleiner als die hintere Querbrücke. Die Oberschale der vorderen Querbrücke hat in sich eine große Bauteiltiefe. Diese Tiefe wird nicht

nicht durch reines Tiefziehen erreicht, sondern das Blech wird umgeformt, ohne daß die Ränder des Bleches festgehalten werden. Blech kann also immer von den Seiten nachfließen. Durch diesen Vorgang werden dünne Blechbereiche (Dünnzug) vermieden.

Das Umformwerkzeug (Biegestempel) in der zweiten und dritten Operation erreicht entsprechend der Bauteile eine Werkzeugtiefe von >120 mm. Die maximale Tiefe/Hohe liegt mittig im Bauteil.

3.6 Genauigkeitsanforderungen an Bauteilkanten

3.6.1 Bauteilkanten ohne Funktion

Die Toleranz einer Bauteilkante hängt ganz allgemein davon ab, welche Funktion die Kante erfüllt. Wenn eine Bauteilkante keine Funktion erfüllen soll, wird sie auch in den Toleranzangaben nicht erfaßt. Der Verlauf einer solchen Kante wird nicht nachgeschnitten, er wird durch die Geometrie des Platinenschnitts am Anfang vorgegeben. Eine solche Kante kann schon allein aus fertigungstechnischer Sicht nur sehr grob toleriert sein. Beim Digitalisieren und Rückführen des Bauteils wird von der Instandhaltung der Presserei eine Genauigkeit von 0,2 bis 0,8 mm je nach Größe und Art des Bauteils gefordert. Die Genauigkeit hängt auch von der Lage des Bezugspunkts ab.

3.6.2 Bauteilkanten mit Funktion

Man erkennt den Werkzeugsatz eines Bauteils, dessen Rand eine Funktion hat, am leichtesten daran, daß in der letzten und vorletzten Operation der Rand nachgeschnitten wird. Zuerst wird die Platine grob zugeschnitten, danach wird sie in mehreren Operationen umgeformt und im letzten Schritt werden die Kanten nachgeschnitten. Es wird in dieser Reihenfolge vorgegangen, um eine bestimmte Genauigkeit relativ zu den 3D-Anteilen des Rohteils zu erzielen. Die geforderten Genauigkeiten hängen stark von der späteren Funktion ab und liegen im Bereich weniger Hundertstel Millimeter und bis maximal 0,2 mm Toleranz.

Die Funktion einer Bauteilkante kann in mindestens zwei Gruppen unterteilt werden.

1. Es gibt **Fügekanten,** die in der weiteren Verarbeitung Kanten für eine stoffschlüssige Verbindung zu einem anderen Bauteil darstellen. Beispiele für eine solche Fügung ist das Verschweißen einer Ober- und einer Unterschale, wie sie am unteren Querlenker oder an einem Seitenteil vorkommen.

2. Die zweite Sorte von **Kanten hat mechanische Funktion** und wird von Fall zu Fall mit anderen Bauteilen formschlüssig verbunden. Ein Beispiel für eine solche formschlüssige und sehr fein tolerierte Verbindung ist der Absperriegel in einem automatischen Getriebe. Dieser muß mit seiner Form in einen Innenlamellenträger eingreifen.

   Durchstellungen für Verschraubungen sind normalerweise 10 bis 20 % größer als die durchgeführte Schraube. Hier sind wieder entsprechend grobe Toleranzen möglich.

Die Toleranz einer Bauteilkante kann relativ einfach der Konstruktionszeichnung des Bauteils entnommen werden.

3.7 Unterscheidung nach Werkzeugtypen

3.7.1 Verbundwerkzeuge/Stufenwerkzeuge

Verbundwerkzeuge verbinden verschiedene Fertigungsarten (Schneiden und Umformen), die in einer Presse durchführbar sind, innerhalb eines Werkzeugsatzes. In einer einzelnen Preßoperation kann gleichzeitig gestanzt und geprägt werden. Dieser Fall ist selten.

Zwischen den Stufen bewegen Greife die Werkstücke zum nächsten Ort der Bearbeitung.

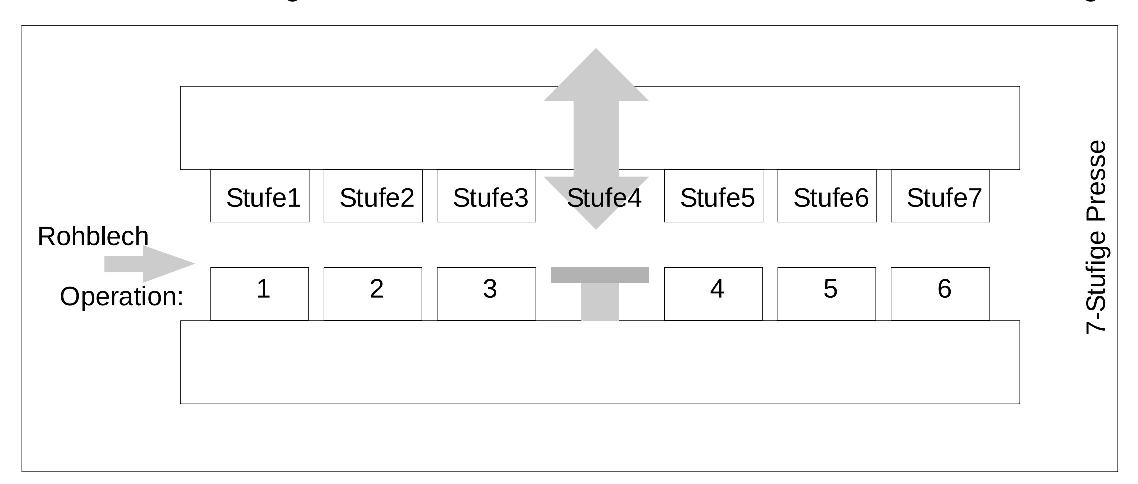


Abbildung 3-10: 7-stufige Presse mit 6-Operationen-Werkzeug

Die Abbildung 3-10 zeigt eine 7-stufige Presse mit einem 6-Operationen-Werkzeug. Die Stufe 4 ist nicht belegt.

3.7.2 Folgeverbundwerkzeuge/Automatenwerkzeuge

Beim Folgewerkzeug existieren keine separaten Stufen, in denen bestimmte Operationen stattfinden. Das Material kommt vom Coil und die Werkstücke werden am Blechband von Preßoperation zu Preßoperation gezogen.

3.7.3 Werkzeuge zum Feinschneiden

Das Feinschneiden (engl. Fineblanking) zählt zu den Scherschneidverfahren. Es wird angewandt, um einbaufertige, metallische Blechteile mit besonderer Präzision herzustellen. Die Schnittflächen der Werkstücke werden aufgrund ihrer hohen Oberflächengüte und dem großen Traganteil ohne Nacharbeit als Funktionsflächen verwendet. Diese wirtschaftlichen Vorteile haben zu einer raschen Verbreitung des Feinschneidverfahrens geführt – vor allem bei Zulieferbetrieben für die Großindustrie (Automobil, Elektro).

Feinschneiden ist ein Metallumformprozeß, bei welchem Werkstücke mit hoher Genauigkeit aus einem Materialstreifen "gestanzt" werden. Höchste Wiederholgenauigkeit zeichnet den automatisierten Prozeß aus:

1. Hohe Genauigkeit von Dimensionen und Rechtwinkligkeit am Werkstück
2. Nahezu 100% Glattschnittanteil
3. Verbesserte Ebenheit gegenüber Grobstanzen
4. Spezialprofile und Löcher können, auch bei außergewöhnlichen Verhältnissen der Durchmesser zur Materialdicke erreicht werden

5. Aushärtung des Werkstückes an der Schnittkante

Gemäß der Abbildung 3-11 wird ersichtlich, weshalb eine dreifach wirkende Presse für den Prozeß benötigt wird:

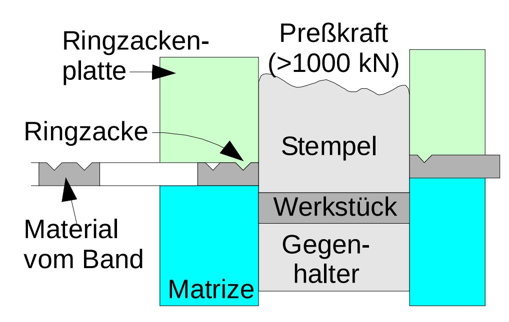


Abbildung 3-11: Vorgang beim Feinschneiden

1. Die Ringzackenplatte dringt ins Material ein, um dieses am unkontrollierten Fließen zu hindern.
2. Die Hauptstanzkraft bewirkt das Schneiden des Hauptstempels im Material.
3. Der Gegenhalter spannt das Werkstück vor und kontrolliert den Materialfluß an der Schnittkante.

Beim Feinschneiden lassen sich besonders dicke Bleche bearbeiten. In der PAC/Pre liegen die verwendeten Blechdicken meist zwischen 6 - 8 mm.

Für die Werkzeuge gilt entlang der Schneidkanten eine sehr feine Toleranz. Diese entsteht durch die sehr geringe Schnittluft (S) beim Feinschneiden.

$$S = B / t$$

Gleichung 3-1: Schnittluft [%] (B: Breite des Schneidspalts [mm] / t: Blechdicke [mm])

Beim Feinschneiden wird eine Schnittluft von ca. 0,5 % benötigt. Dies macht deutlich, warum Stempel und Matrize beim Feinschneiden mit hoher Präzision gefertigt werden müssen. Die Schnittluft beim normalen Stanzen ist ca. 8 %.

3.8 Genauigkeitsanforderungen verschiedener Werkzeugbereiche

3.8.1 Werkzeug-Schnittkanten

Es gibt zwei Arten von Schnittwerkzeugen: 2D-Platinen-Schnittwerkzeuge und Schnittwerkzeuge, deren Kante im Raum (3D) verläuft. Aber der Schnitt wird in den meisten Fällen entlang des negativen Z-Vektors ausgeführt (prismatischer Schnitt, von oben nach unten).

- Es gibt **reine 2D-Schnittwerkzeuge**, deren Schnittkanten innerhalb einer Ebene, meist in der Z-Ebene, verlaufen (Feinschneiden). Wenn das Blech noch unbearbeitet ist, wird ein solches Werkzeug als Platinenschnitt-Werkzeug bezeichnet. Das Blech kommt zu diesen Werkzeugen meist direkt vom Coil (Rolle mit Rohblech), vergleiche Abbildung 3-12.
- Alle **anderen Schnittwerkzeuge** schneiden bereits fertig geformte Blechbauteile nur noch nach. Deren Schnittkonturen verlaufen im Raum und sind somit viel aufwendiger zu digitalisieren.

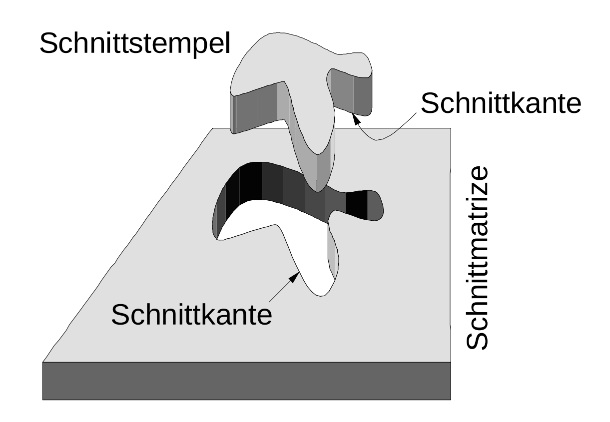


Abbildung 3-12: Schnittstempel und –matrize eines Platinenschnittwerkzeugs (2D)

Wenn die Schnittkante eines Werkzeugs digitalisiert wird, hängt die geforderte Genauigkeit in erster Linie davon ab, ob das Gegenstück des Schnittwerkzeuges von der zuerst digitalisierten Kante abgeleitet wird, oder ob die Schnittkante nur einseitig verändert werden soll.

Falls nur die Matrize oder der gegenüberliegende Stempel (vergleiche Abbildung 3-12 und Abbildung 4-4) eines Blechschnittes digitalisiert wird, hängt die geforderte Genauigkeit des Digitalisierens ab von den

- Funktionskanten am Bauteil
- Schweißkanten am Bauteil
- Freien Kanten am Bauteil

3.8.2 Werkzeugbereiche zum Lochen oder Durchstellen

Je nach Verwendung der Lochung und je nach Art des Zusammenbaus, sind die Toleranzen bei diesen Bauteileigenschaften sehr unterschiedlich und können nicht einheitlich zusammengefaßt werden.

3.8.3 Flächen zum definierten Umformen

Die Instandhaltung der PAC/Pre hat bei vielen Werkzeugkonturen den Anspruch von 20 µm Toleranz bei der Reproduktion von Biegewerkzeugen. Die Genauigkeitsanforderungen bei den entsprechenden Bauteilen liegt viel niedriger. Diese hohe Genauigkeit wird mit fertigungstechnischen Aspekten begründet.

Jede kleine Flächenkrümmung kann je nach Ausprägung beim Ziehen als Fließbremse wirken. Fehlt eine solche Flächenkrümmung oder ist sie durch ungenaue Rekonstruktion anders gestaltet, könnte es vorkommen, daß ein Bauteil nicht auf die vorgesehene Weise gefertigt wird. Das Fertigteil würde von der gewünschten Form und Mindestblechdicke abweichen. Das Werkzeug wäre unbrauchbar.

3.9 Fazit

Alle Bauteile in der PAC/Pre sind eindeutig und schnell nach ihrer Verwendung (Motor, Getriebe, Achse (vorn/hinten, links/rechts) klassifizierbar. Eine stukturelle Ähnlichkeit läßt sich aber nur bei sehr wenigen Bauteilarten ausmachen.

Die PAC/Pre produziert über 30 verschiedene Bauteile, die als Halter bezeichnet werden. Der Verwendungszweck der Bauteile ist in vielen Fällen nicht eindeutig. Am Motor, am Getriebe und an den Achsen werden diese kleinen Blechbauteile für verschiedenste Zwecke verwendet. An Halter können beispielsweise Kabelbäume, Kraftstoffleitungen, Hydraulikleitungen und Sensorenleitungen befestigt werden. Halter können als Zwischenstücke für Anbauteile am Motor oder am Getriebe funktionieren. Halter können in ihrer Struktur oder in ihrem Verwendungszweck nicht zusammengefaßt werden, so wie einige andere Bauteile, die untereinander den gleichen Namen haben, auch.

Bei Bauteilen wie dem Seitenteil oder dem Querlenker existieren Ausnahmen in der Zusammenfaßbarkeit. Die Form, Größe, Werkstoff, Blechdicke, Ziehtiefe usw. müssen keine Ähnlichkeit mit gleichen Bauteilen aus anderen Modellen haben.

4 Untersuchung der Einbindung eines externen Lieferanten in die Prozeßkette Blechteile

Am Beispiel eines externen Werkzeuglieferanten für Preßwerkzeuge soll exemplarisch die Einbindungsmöglichkeit externer Werkzeugdokumentationen in die Instandhaltung der Preß- und Schnittwerkzeuge genauer untersucht werden.

Die erste Analyse der Werkzeuge in der Instandhaltung für Preß- und Schnittwerkzeuge ergab, daß ein großer Anteil der Werkzeuge, die zum Pressen von Achsteilen verwendet werden, von externen Werkzeuglieferanten konstruiert und geliefert werden.

Aufgrund des hohen Anteils von Werkzeugen, die nicht vom internen Betriebsmittelbau (BMB) hergestellt werden, soll analysiert werden, inwieweit die Dokumentationen der externen Lieferanten in die Instandhaltung einbezogen werden können. Mit den Werkzeugdokumentationen sind hier Geometriedatenbeschreibungen, Montagepläne (Zusammenbaupläne) und Stücklisten gemeint, die als Basis bei der computerunterstützten Fertigung der Werkzeuge dienen, wie *z. B.*: Drahterodierkanten und Freiformflächen.

4.1 Die Entwicklung eines Preßwerkzeuges

Die genaue Kenntnis über die Entwicklung, Konstruktion und Fertigung eines Werkzeugs kann Aufschluß über die Änderungseinflüsse geben. Der Weg von der Bauteilentwicklung bis zur Serienproduktion soll im folgenden unter dem Aspekt der Qualitätsanforderungen auf den folgenden Seiten beleuchtet werden.

Die Entstehung eines Werkzeugs wird am Beispiel eines Preßteils aus Blech erklärt. Zunächst existiert die geometrische Beschreibung des Fertigteils, von diesem wird zuerst das Rohteil abgeleitet. Das benötigte Werkzeug ist Umsetzung des Rohteils aus fertigungstechnischen Gesichtspunkten (Gießen, Pressen, Schmieden), vergleiche Kapitel 3.1. Ein Werkzeug ist immer die fertigungsbezogene Abbildung eines Rohteils, man spricht auch vom *Warmmodell*. Ein Warmmodell eines Gußrohteils beinhaltet beispielsweise alle Schrumpfungsaufmaße, ähnlich dem Warmmodell beim Schmieden. Ein Preßwerkzeug (Biegestempel) unterscheidet sich um den Betrag der elastischen Rückfederung vom Rohteil.

Das Bauteil wird, wie in Kapitel 2.2 erwähnt, von der Entwicklung im Werk 019 entworfen. Von dort werden die Entwicklungsdaten ins Werk 010 (Aggregatebau) geleitet und sind Grundlage für die Produktionsplanung (PP).

Die Produktionsplanung setzt sich mit der allgemeinen Planung der Fertigung eines Rohteils auseinander. Das Produktionsszenario wird entworfen. Das Werkzeug kann von der internen Prozeßkette (Betriebsmittelkonstruktion und Betriebsmittelbau) oder von einem externen Lieferanten konstruiert und hergestellt werden, vergleiche Abbildung 4-1. Für die erforderlichen Betriebsmittel, die angeschafft oder hergestellt werden müssen, holt die Produktionsplanung von internen und externen Lieferanten Angebote ein.

Der Auftrag zur Herstellung eines Werkzeugs wird der Analyse der eingereichten Angebote vergeben. Dabei werden die bisherigen Erfahrung mit dem jeweiligen Lieferanten berücksichtigt. Die Analyse der Werkzeuge in der Produktion von Blechteilen hat ergeben, daß ein großer Anteil der dort eingesetzten Werkzeuge von solchen externen Lieferanten konstruiert und hergestellt wird.

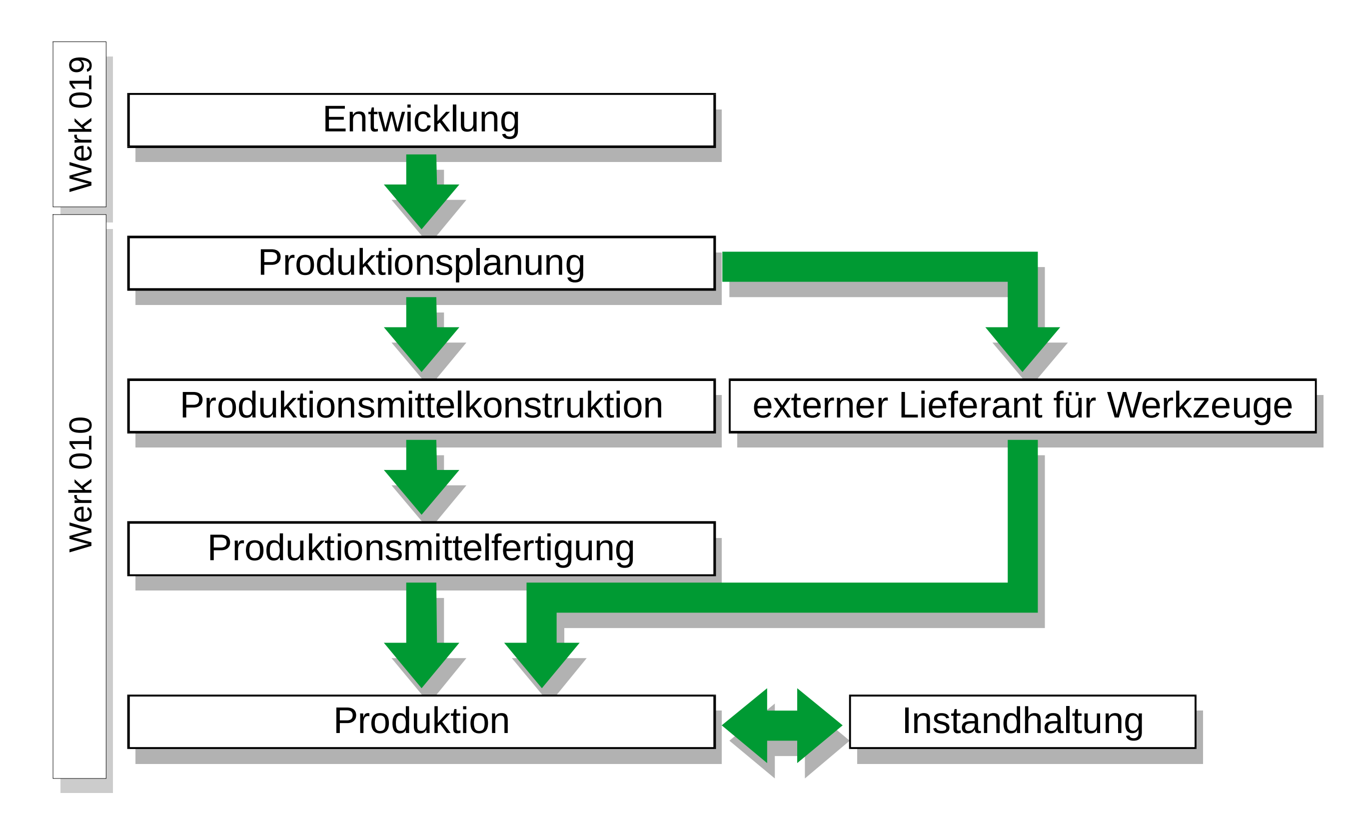


Abbildung 4-1: Zwei mögliche Wege eines Werkzeugs in die Produktion

4.2 Ablauf der Freigabe eines Werkzeuges

Die Produktion eines Bauteils kann erst nach der Freigabe des entsprechenden Werkzeugs beginnen. Zur Freigabe eines Werkzeugs gehört die Qualitätsprüfung der damit abgepreßten Rohteile. Zur Erinnerung: Rohteile bezeichnen hier die unbearbeiteten Teile, die aus der Presse kommen. In den meisten Fällen werden Blechrohteile nicht mehr spanabhebend weiterbearbeitet, in solchen Fällen ist das Rohteil identisch mit dem Fertigteil.

Dieser Vorgang wird im allgemeinen auch als Erstbemusterung (vergleiche Kapitel 4.2.3) bezeichnet. Nach erfolgreicher Prüfung durch die Qualitätssicherung (QS), wird das Werkzeug freigegeben. Danach kann die Serienproduktion anlaufen.

4.2.1 Qualitätsprüfung vor der Serienteils

Die Abteilung für Qualitätssicherung (QS) legt in Zusammenarbeit mit der Entwicklung die Prüfmerkmale am Bauteil fest. Diese Merkmale sind meist Maßangaben von der Konstruktionszeichnung des Bauteils. Aber nicht alle Kenngrößen der Konstruktion werden in den Meßauftrag für das Meßprotokoll aufgenommen. Nur produktions- und sicherheitsrelevante Eigenschaften sollen geprüft werden. Produktionsrelevant sind Kanten, entlang derer im Laufe der Weiterverarbeitung geschweißt wird, alle Kanten und Flächen, die mit einem anderen Bauteilen auf stoff- oder formschlüssige Weise verbunden werden, Bohrungen, durch die Stifte oder Schrauben durchgeführt werden etc. (siehe Kap. 3.6).

Der von der Qualitätssicherung festgelegte Prüfauftrag enthält deutlich mehr Einzelprüfungen als der Prüfauftrag, der später für die Serienproduktion erstellt wird. Dies ist sinnvoll, da manche geometrische Ausprägungen sich im Laufe der Produktion nicht mehr ändern können.

Zum Beispiel müssen Durchstellungen (Bohrungen im Blech), die in ein- und derselben Preßoperation gefertigt werden, nur einmal bei der Erstbemusterung in der Lage zueinander geprüft werden. Die Bolzen für die Fertigungsoperation haben am Werkzeug relativ zueinander immer die gleiche Lage. Eine weitere Prüfung im Laufe der Produktion ist dann nicht mehr notwendig.

Prüfverfahren von nicht ebenen Flächen sind noch in der Entwicklungsphase. An einem Achsteil der A-Klasse wurden Prüfverfahren zum Vergleich einer Oberflächengeometrie des physischen Fertigteils zum CAD-Modell des Fertigteils prototypisch durchgeführt. Dabei wurde die Machbarkeit eines solchen Prüfverfahrens nachgewiesen. In Zukunft könnten alle Flächen- und Kantenbereiche eines Fertigteils aus Blech gegen das CAD-Modell gemessen werden. Dies entspricht einem rechnerinternen Soll-Ist-Vergleich anhand von Koordinatentripeln, die am physischen Vergleichsobjekt aufgenommen werden.

4.2.2 Versandabnahme

Bevor ein Werkzeug eines externen Lieferanten ins Werk und damit in die Produktion kommen kann, wird eine Versandabnahme von Versuchsteilen durchgeführt. Bei dieser Kontrolle werden die Rohteile kontrolliert, die der Werkzeughersteller mit seinem neuen Werkzeug hergestellt hat. Die Qualitätssicherung des Herstellers erstellt auf der Basis des Prüfauftrags von der Qualitätssicherung ein Meßprotokoll des gefertigten Rohteiles. Die in diesem Protokoll zu messenden Eigenschaften wurden vorab von der Qualitätssicherung des Auftraggebers festgelegt. Dieses Protokoll wird zusammen mit ein paar Vorabpressungen an die Produktionsplanung geschickt. Die Qualitätssicherung wertet das Protokoll aus und kann in der Regel noch Nachbesserungen am Werkzeug fordern.

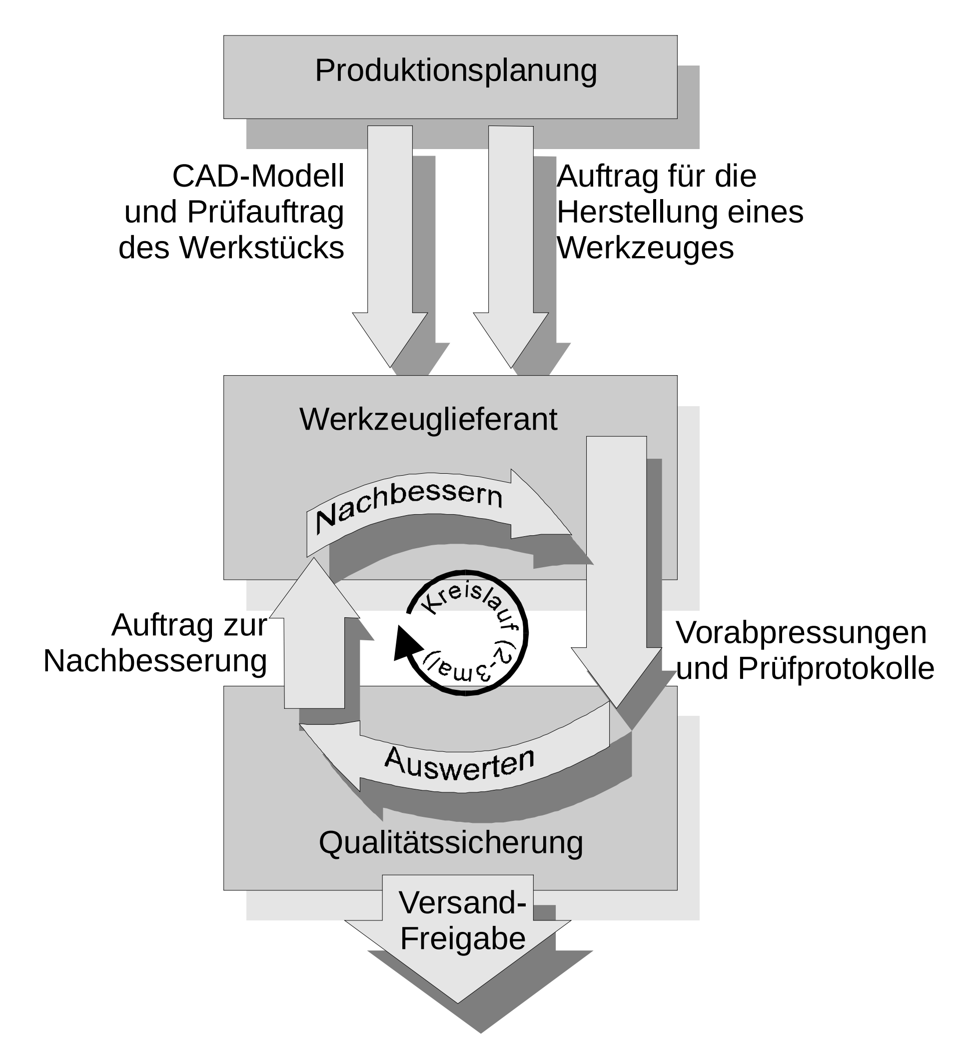


Abbildung 4-2: Skizzierter Ablauf einer Versandfreigabe mit Nachbesserung

Dieser Kreislauf von Nachbesserungen wird in der Regel zwei- bis dreimal durchlaufen. Wenn die Teile innerhalb der von der Qualitätssicherung geforderten Toleranzen liegen, erfolgt die Freigabe für eine Lieferung des Werkzeugs ins Werk. Dies kann auch als Versandfreigabe bezeichnet werden. Theoretisch ist es möglich, eine Freigabe zu erteilen, ohne Nachbesserungen zu fordern, dieser Fall kommt aber nur selten vor.

Es ist wichtig anzumerken, daß bei der Versandabnahme und bei der nachfolgenden Erstbemusterung (vergleiche Kapitel 4.2.3) eines Bauteils keine Freiformflächen geprüft werden. Das bedeutet, daß gekrümmte Bauteilflächen nicht auf ihre geometrische Ausprägung hin geprüft werden. Es werden nur ebene Flächen auf Form und auf Lage zum Bauteil hin geprüft. Außerdem werden signifikante Punkte auf dem Fertigteil festgelegt, die in ihrer Lage zu einem Ausgangspunkt hin geprüft werden. Diese Punkte können auf dem gesamten Bauteil verteilt sein. Die genaue Lage der Kontrollpunkte wird von der Qualitätssicherung festgelegt.

4.2.3 Ablauf einer Erstbemusterung

Erstbemusterung nennt man die Erstabnahme eines Werkzeugs der damit gefertigten Rohteile innerhalb des Werks. Das bedeutet, daß nicht das Werkzeug geprüft oder vermessen wird, sondern immer das damit unter Bedingungen der Serienproduktion hergestellte Rohteile. In der Presserei sind die fertigungstechnischen Parameter anders als beim Hersteller des Werkzeuges: Die Hubzahl unter Serienbedingungen und andere vom Umfeld abhängige Einflußgrößen lassen

sich nicht mit einer Einzelpresse simulieren. Einzelpressen werden meist zum Testen von Preßwerkzeugen im Betriebsmittelbau verwendet.

Die Erstbemusterung läuft je nach Bauteil und dem Lieferanten unterschiedlich ab. Die genaue Vorgehensweise legt die Qualitätssicherung (QS) in Zusammenarbeit mit der Produktionsplanung (PP) individuell fest. Zuerst muß die im Kapitel 4.2.2 beschriebene Versandabnahme stattfinden. Wenn an den Prüfprotokollen und den gelieferten Rohteilen nichts mehr zu beanstanden ist, wird das Werkzeug ins Werk und in die Presserei geliefert.

Im Werk beginnt die eigentliche Abnahme des Werkzeuges, die Werksabnahme. Das Werkzeug wird in eine Presse eingebaut und preßt nun unter Serienbedingungen einige Hundert Rohteile ab. Mit diesen Vorabpressungen wird dann in der Qualitätssicherung die Erstbemusterung durchgeführt. Gleichzeitig kann ein letzter Abgleich stattfinden. Oft werden noch die Handhabungseinrichtungen zwischen den einzelnen Preßoperationen justiert und eventuell kleine Bereiche von Umformwerkzeugen (Stempel/Matrize) oberflächig nachbearbeitet.

Sobald die Qualitätssicherung das Werkzeug freigibt, wird mit dem eingebauten Werkzeug eine bestimmte Stückzahl von Pressungen mit dem in die Presse eingebauten Werkzeug durchgeführt. Mit diesen Teilen wird in der Montage in der Regel die Vorserie eines Fahrzeuges gebaut.

4.3 Qualitätssicherung in der Serienproduktion

Pressen, die zur Herstellung von Achsteilen verwendet werden, produzieren pro Minute zwischen 10 bis 15 Rohteile. Von der QS wird je nach zu prüfender Eigenschaft des Rohteils ein bestimmter Prüfzyklus festgelegt.

Alle Prüfmerkmale und die dazugehörige Prüfhäufigkeit werden im Prüfauftrag festgelegt. Die zu den einzelnen Prüfungen gehörenden Prüfmittel stellt die Qualitätssicherung der Produktion zur Verfügung. Manche Prüfmittel sind einfache Lehren und andere Standardmeßgeräte. In vielen Fällen müssen jedoch spezielle Prüfvorrichtungen zur Herstellung von Prüfmitteln in Auftrag gegeben werden.

Die Prüfung eines Bauteils besteht aus drei Teilen:

1. Bei der **Sichtprüfung** wird die Oberfläche auf Risse, Ziehriefen und andere Schädigungen hin überprüft.
2. Die **Funktionsprüfung** kommt bei Blechteilen, die gerade von der Presse umgeformt wurden nicht häufig vor, da die Rohteile nur selten sofort eine Funktion besitzen.
3. Die **Maßprüfung** kann alle der Größe nach erfaßbaren Eigenschaften, wie Durchmesser und Blechdicke prüfen.

Zur Maßprüfung:

Abstand von Bohrungen (Durchstellungen) zu anderen Kanten werden geprüft. Dabei werden nur Abstände von Bohrungen und Kanten geprüft, die nicht in einer Preßoperation entstanden sind. Schnitte, die in zwei aufeinanderfolgenden Stufen durchgeführt wurden, unterliegen einer gewissen Streuung, da die genaue Lage des Rohteils zu den jeweiligen Werkzeugen nicht definiert ist.

Blechdicken an bestimmten Stellen, die einem sehr starken Umformungsgrad unterliegen, werden meist mit Hilfe von Bügelmeßschrauben auf eine Mindestblechdicke hin untersucht.

Bereiche, in denen die Blechdicke unterhalb einer von der Entwicklung vorgegebenen Toleranz liegen, nennt man Dünnzug.

Ein solcher Prüfauftrag kann sehr aufschlußreich sein, wenn vor einer eventuellen Flächenrückführung die geforderten Genauigkeiten der Oberflächen analysiert und festgelegt werden müssen. Der Prüfauftrag enthält hierzu genaue montage- und sicherheitsrelevante Toleranzangaben, an denen man sich bei der Rückführung einer Geometrie orientieren kann.

4.4 Normen, Vorschriften und Vereinbarungen

Um die Einbindung eines Lieferanten im Daimler-Benz-Konzern zu regeln, existieren Vorgaben, die die Art und Weise der Zusammenarbeit regeln. Solche Vorgaben werden im folgenden beschrieben:

4.4.1 Daimler-Benz-Liefervorschrift (DBL)

In der DBL 9704 wird dem Werkzeuglieferanten von Schnitt-, Zieh-, Stanz- oder Preßwerkzeugen vorgeschrieben, welche Normen die zu liefernden Werkzeuge erfüllen müssen. Vorrangig geben diese Normen den ganz groben Aufbau des Werkzeugs vor, außerdem beispielsweise welche Lacke und Farben zu verwenden sind, welche Begleitdaten geliefert werden müssen und vieles andere mehr [DBL94].

Zur Zeit sind die Werkzeuglieferanten verpflichtet, die Dokumentation des Werkzeugs als Zeichnungen (in Papierform mit Stücklisten) zu liefern. Daneben müssen die NC-Programme mitgeliefert werden, mit denen das Werkzeug hergestellt wurde.

4.4.2 Mercedes-Benz-Norm (MBN) für CAD

Der wachsende Anteil an CAD/CAM-Modellen in der Produktentwicklung und der damit verbundene vermehrte Austausch von Modelldaten machen eine einheitlich Strukturierung der Modelle notwendig.

In der Daimler-Benz-Norm für CAD und in den normähnlichen Festlegungen werden Vereinbarungen getroffen, die dem gesamten Bereich der Produktentwicklung zugrundeliegen.

Diese Normen und Vorschriften gelten sowohl für den Datenaustausch (siehe DAV) innerhalb der einzelnen Entwicklungsbereiche, *z. B.* Konstruktion und Entwicklung, als auch für die Datenübertragung zu nachgelagerten Bereichen im Sinne der Prozeßkette (Entwicklung → Fertigungsplanung → Betriebsmittelkonstruktion (BMK) → Ersatzteilwesen → usw.).

Die Daimler-Benz-Norm für *CATIA* umfaßt fünf Artikel, die die Freiheitsgrade im Konstruktionsprozeß einschränken und einen Datenaustausch erleichtern. [DBN91]

- MBN 10008; LAYER-Belegung in CAD-*CATIA*; Stand: 08.1991
- MBN 10058; Basis-Startmodell in CAD-*CATIA*; Stand: 04.1992
- MBN 10059; *CATIA*-Modellnamen; Stand: 03.1995
- MBN 10103; Aufbau von *CATIA*-Modelldatenstrukturen; Stand: 06.1995
- MBN 10124; *CATIA*-Dateinamen; Stand: 07.1994

Die MBN gilt im Gegensatz zur Liefervorschrift und Datenaustauschvereinbarung nicht automatisch für einen externen Lieferanten von Werkzeugen. Wenn in den Lieferumfang von Betriebsmitteln die CAD-Daten der Werkzeuge mit aufgenommen werden würden, müßte auch

eine Vereinbarung über den Aufbau der CAD-Daten getroffen werden. Es läge nahe, die konzerninterne MBN auf den Werkzeuglieferanten auszuweiten.

Dabei entstünde in manchen Fällen seitens des Lieferanten ein Interessenskonflikt, da die Werkzeuglieferanten ihrerseits auch interne und externe Vereinbarungen über CAD-Modell-Daten haben. Die Werkzeuglieferanten haben ihrerseits wiederum ihre Sublieferanten für Konstruktionen.

4.4.3 Datenaustauschvereinbarung

Um den Verkehr von CAD-Daten von den Firmen, die CAD-Daten liefern, regeln zu können, müssen Vereinbarungen für den einheitlichen Datenaustausch getroffen werden, sogenannte Datenaustauschvereinbarungen (DAV).

Eine Datenaustauschvereinbarung (DAV) ist eine schriftlich fixierte Vereinbarung über Vorgehensweise, Inhalte, Qualität und Eigenschaften von CAD-Daten, die zwischen den Beteiligten ausgetauscht werden. An einem Datenaustausch nehmen drei Parteien teil, vergleiche hierzu Abbildung 4-3.

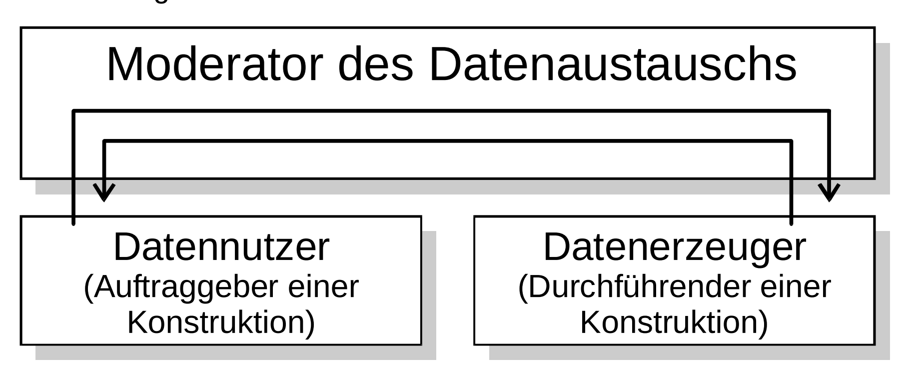


Abbildung 4-3: Beteiligte am Datenaustausch

Der Datenaustausch kann im einfachsten Fall unidirektional gerichtet sein, *z. B.*: Daten laufen von dem DNC-Rechner zum CNC-Bearbeitungszentrum. Ein solcher einseitiger Datenfluß ist aber äußerst selten.

Daten aus der Entwicklung werden beispielsweise in die Planung gegeben, dort bearbeitet und laufen teilweise aufgrund von Änderungsvorschlägen wieder zurück. Und auch neuere CNC-Bearbeitungszentren melden an den DNC-Rechner den Erhalt oder den Bearbeitungsstatus wieder zurück. Somit ist der Datenaustausch bidirektional.

Die DAV wird zwischen dem Auftraggeber, der die Daten später nutzen möchte, und dem Durchführenden, der die Daten erzeugt, unter Aufsicht eines Moderators abgeschlossen. Das Daimler-Benz-CAD-Handbuch [DM98] für produktionsbeschreibende Daten enthält im Kapitel CA009 ein Formular zur Festlegung von Datenaustauschvereinbarungen. An der gleichen Stelle findet sich auch eine Checkliste, mit deren Hilfe die vorher vereinbarten Punkte geprüft werden können.

Bei Datenaustausch produktionsrelevanter Daten ist der Auftraggeber in der Regel ein Fachbereich aus dem Automobilkonzern und der Auftragnehmer ein Konstruktionsbereich einer externen Firma. Generell ist es aber durchaus sinnvoll, Vereinbarungen auch zwischen Daimler-Benz-internen Bereichen abzuschließen. [Schr97]

4.4.4 Daimler-Benz CAD-Handbuch

Alle Festlegungen für produktionsbeschreibende Daten und deren Austausch, Inhalt und Gestaltung sind im Daimler-Benz CAD-Handbuch festgehalten. Es ist für alle produktionsbeschreibenden Daten mechanischer Umfänge gültig und soll die Erzeugung, Kontrolle und den Datenaustausch von CAD-Daten standardisieren, um die Prozeßsicherheit zu verbessern.

Dieses Handbuch steht allen Prozeßbeteiligten der Daimler-Benz AG sowie den externen Partnern und deren Sublieferanten kostenfrei in Papierform und als Online-Dokument zur Verfügung. Es wird zwei- bis dreimal pro Kalenderjahr aktualisiert.

Das Daimler-Benz CAD-Handbuch steht auch den externen Werkzeuglieferanten von Preßwerkzeugen schon frei zur Verfügung, obwohl die Lieferanten noch keine CAD-Daten liefern, sondern nur die Geometriedatenbeschreibung in Papierform dem Werkzeug beilegen.

***CATIA*-Startmodell**

Das „Daimler-Benz CAD-Handbuch“ schreibt allen Bereichen die Benutzung des *CATIA*-Startmodells vor. Dies ist die Vorlage eines leeren CAD-Modells, in dem alle Grundeinstellungen vorgegeben sind. Solche Grundeinstellungen sind beispielsweise Füllpatterns, benutzbare Zeichensätze, Farbeinstellungen, Linienarten und Beschriftungsarten. Diese Einstellungen werden nicht mit dem CATIA-Modell gespeichert, sondern sind lokale Einstellungen der jeweiligen CATIA-Installation.

Das *CATIA*-Startmodell wird beim Daimler-Benz-Konzern allen externen Konstruktionsbüros und internen Bereichen, die mit *CATIA* arbeiten, kostenlos über das Intra-/InterNet zur Verfügung gestellt. Das Startmodell ist am ehesten mit einer Dokumentvorlage in einem Textverarbeitungsprogramm zu vergleichen.

4.5 Allgemeines über den ausgewählten Werkzeuglieferanten

Um die Einbindungsmöglichkeit der produktionsbeschreibenden Daten der externen Lieferanten in die Instandhaltung für Schnitt- und Preßwerkzeuge genauer beurteilen zu können, wurden von einem ausgewählten Werkzeuglieferanten mehrere Geometriedatenbeschreibungen exemplarisch ausgewählter Werkzeuge als CAD-Modell übertragen.

Der hierfür ausgewählte Lieferant ist ein mittelständisches Unternehmen mit über 1000 Mitarbeitern, der nicht nur im Bereich von Blechumformwerkzeugen tätig ist. Durch die jahrzehntelange Erfahrung im Preßwerkzeugbau ist diese Firma ein Lieferant von Stufensätzen aller Art für die Daimler-Benz AG. Es wurden in der Vergangenheit nicht nur für viele Blechbauteile im Achsbereich die Werkzeuge geliefert, sondern auch für den Bereich der Karosserieaußenhaut.

4.6 CAD-Dokumentation des externen Lieferanten von Preßwerkzeugen

Die CAD-Dokumentation eines Werkzeugs von einem externen Lieferanten wird an einem aktuellen Beispiel beschrieben. Hierzu werden die CAD-Beschreibungen von einer einzelnen Preßoperation eines vierstufigen Werkzeugsatzes zum Abpressen eines Hinterachsbauteils in die Instandhaltung übertragen.

An dieser Stelle sei erwähnt, daß ein Werkzeug zum Pressen von Rohteilen aus zwei oder drei Preßoperationen bestehen kann. Meist ist ein Preßwerkzeug aber auf sieben bis acht

Operationen verteilt. In komplexen Einzelfällen können Werkzeuge für Getriebebauteile auf über zwanzig Operationen verteilt sein.

Der ausgewählte, externe Hersteller beschreibt seine Werkzeuge mit verschiedenen CAD-Programmen gleichzeitig. Der äußerliche Aufbau des Werkzeugs wird mit *AutoCAD* konstruiert, und somit liegen alle 2,5D-Anteile der gesamten Konstruktion als *AutoCAD* Zeichnung vor. Schnittkonturen von Schnittwerkzeugen sind ebenfalls als Kurvenzug in den Einzelansichten von *AutoCAD* enthalten. *AutoCAD* dient dem Werkzeuglieferanten zum Konstruieren der Umgebungskonstruktion des eigentlichen Preßwerkzeuges.

Das eigentliche Umformwerkzeug (Biegestempel) wird vom Lieferanten in *CATIA* V4 R1.7 erstellt. Ein Umformwerkzeug besteht immer aus einem Stempel und der gegenüberliegenden Matrize. Das Werkzeugpaar (Biegestempel und Matrize) unterscheidet sich also genau um die Blechstärke des dazwischenliegenden Rohteils. Das Werkzeug, das vom gegenüberliegenden Werkzeug eingehüllt wird, bezeichnet man als Stempel, vergleiche Abbildung 4-4.

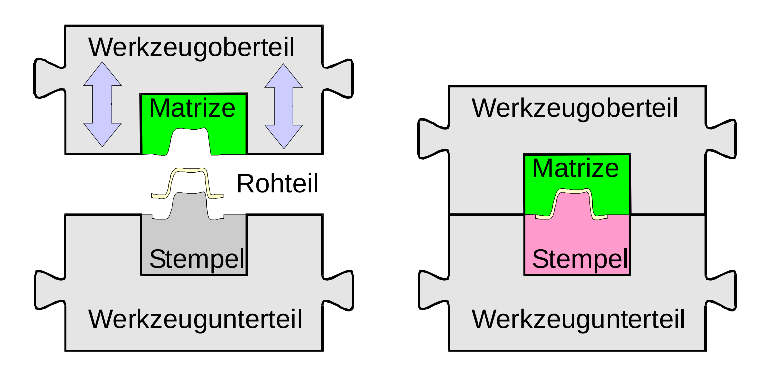


Abbildung 4-4: Biegestempel und dazugehörige Matrize

Die Freiformanteile des Werkzeugpaares werden in *CATIA* von der Geometriebeschreibung des Rohteils abgeleitet. Dabei werden fertigungstechnische Parameter des Blechumformens berücksichtigt. Das heißt, daß ein elastisches Rückfedern des Bleches bei der Auslegung des Werkzeugs mit in die Kontur der umformenden Werkzeuge eingeplant wird.

4.7 Übertragung der Daten

Der externe Lieferant von Werkzeugen benutzt zur Übertragung der CAD-Daten das Odette Filetransfer Protokoll (OFTP). Die Daten werden über eine ISDN-Verbindung von der Konstruktionsabteilung des Lieferanten nach Untertürkheim übertragen und von dort aus weitergeleitet. Diese Art der Datenübertragung hat sich bewährt.

In Zukunft sollen alle Daten mit dem prozeßsichereren EngDat-Protokoll übertragen werden. Eine DB-interne Richtline schreibt dies schon für den Beginn des Jahres 1998 vor.

4.7.1 *SWAN* – System zum weltweiten Austausch von Nutzdaten

SWAN ist ein System zum weltweiten Austausch von Nutzdaten. Die Software wurde von der *debis AG*, einem Dienstleistungs-Unternehmen der Daimler-Benz AG entwickelt, um den Austausch von Nutzdaten zu erleichtern und innerhalb des Konzerns und gegebenenfalls darüber hinaus zu vereinheitlichen. Die Funktionsweise dieses Programmes soll im folgenden exemplarisch für Programme zum Nutzdatenaustausch vorgestellt werden.

Swan unterstützt das alte Odette-Protokoll [VDA 4914/2] und den neuen EngDat-Standard [VDA 4951]. Das Odette-Filetransfer-Protokoll (OFTP) ist mittlerweile zum Standard in der Automobilindustrie geworden. Wenn technische Zeichnungen, 3D-CAD-Modelle, NC-Programme oder andere Informationen in Dateiform übertragen werden sollen, führt kein Weg mehr an OFTP vorbei. Der Datenaustausch ohne Papier oder Datenträger minimiert den Zeitaufwand, er wird zur Bedingung für die Auftragsvergabe und sichert damit die Wettbewerbsfähigkeit der Lieferanten.

Gemäß Vereinbarung zwischen der Daimler-Benz AG (Geschäftsfelder PKW und Nfz) und den externen Partnern im Rahmen der TANDEM-Veranstaltungen werden CAD-Daten grundsätzlich mittels ISDN-Datenfernübertragung (DFÜ) auf Basis der oben genannten VDA-Empfehlungen ausgetauscht. Der Austausch über Offline-Medien (DAT, Disketten, CD-ROM, usw.) sollte laut dieser Empfehlung die Ausnahme bleiben.

Mit der Weiterentwicklung von *SWAN* wird das Ziel verfolgt, eine direktere und schnittstellenarme Kommunikation von Konstrukteur zu Konstrukteur mit hoher Prozeßsicherheit und Wirtschaftlichkeit durch Einsatz dieser brancheneinheitlichen Standards zu erreichen.

Die folgenden VDA-Richtlinien regeln den Ablauf des Datenaustauschs näher:

- VDA 4914/2 ODETTE File Transfer Protokoll (OFTP)
- VDA 4951 ENGDAT (Engineering Data Message)
- VDA 4951 ENGPART (Engineering Partner Data)
- VDA 4950 Vereinbarungen zum CAM-Datenaustausch

4.7.2 *CATIA*-Daten

Die Werkzeugoberflächen (Freiformflächen) sind in einem *CATIA*-Model-File enthalten. Dieses *CATIA*-File der Stempeloberfläche belegt *ca.* 4 MB Speicherplatz. Der *CATIA*-Modellname, der vom Lieferanten benutzt wird, entspricht im Fall des übertragenen CATIA-Modells den Richtlinien in der Mercedes-Benz-Norm [MBN 10 059].

Die Belegung der einzelnen Zeichenebenen, die Layerbelegung des übertragenen *CATIA*-Modells entsprach nicht den in der Mercedes-Benz-Norm [MBN 10 059] festgelegten Vorgaben. Die Konstruktion des Umformwerkzeugs belegt insgesamt 8 Ebenen, die nicht nach der Mercedes-Benz-Norm beschriftet sind.

Die Mercedes-Benz-Norm 10 008 gibt die Belegung der 255 in *CATIA* verfügbaren Layer in Fünferblocks vor. Layers mit der Endziffer ..1 oder ..6 sollen mit Strich- oder Drahtgeometrien (Wires) belegt werden, wie *z. B.* Achsensysteme oder Körperkanten. Die Layers mit der Endziffer ..2 und ..7 sind für Flächengeometrien reserviert (Face, Surface, Plane, Skin). Körper (Solids) gehören nur auf Layers mit den Endziffern ..3 und ..8 und alle Formen von Beschriftungen, Bemaßungen. Die Layers ..5 und ..0 werden nur für seltener benötigte Spezialelemente verwendet (Kinematik, Robitic, Simulation).

Der Werkzeuglieferant benutzt noch seine eigenen Vorgaben zur Layerbelegung, die intern bei ihm auch einheitlich geregelt ist. Eine Anpassung an die CAD-Norm für *CATIA*-Modelle ist in Vorbereitung.

4.7.3 *AutoCAD*-Daten

Die Abteilung Kleinwerkzeugbau des externen Lieferanten konstruiert mit *AutoCAD* R13 den Bereich des Preß- oder Schnittwerkzeuges, der keine Freiformanteile beinhaltet. Daraus ergibt sich, daß *ca.* 80 bis 90 *%* des gesamten Werkzeugs in *AutoCAD* erstellt werden.

Der Lieferant von Preßwerkzeugen benutzt eine für den Bereich Maschinenbau spezifische Erweiterung für *AutoCAD*: GENIUS. Drawings, die mit Hilfe dieser Zusatzapplikation erstellt wurden, unterscheiden sich nicht von anderen Zeichnungen. Die Hilfe besteht nur aus unterstützenden Befehlen, wie *z. B.* parametrisierte Normteile, automatische Stückliste, Federberechnungen, Formeleditor und vieles andere mehr.

Die *AutoCAD*-Zeichnung enthält die genaue und sehr detaillierte Stückliste aller verwendeten Einzelteile (*z. B.*: Schrauben, Distanzscheiben, Auswerfer, Federn, Dämpfer, Gußober- und Gußunterteil, Biegebacken und so weiter). Außerdem ist bei jedem Element der Stückliste der Werkstoff, die Abmessungen und die Bezugsquelle aufgeführt.

Eine genaue Untersuchung der acht übertragenen *AutoCAD*-Dateien hat ergeben, daß innerhalb der *AutoCAD*-Zeichnungen zwölf verschiedene Schriftarten benutzt wurden, die nicht zum Standard in *AutoCAD* R13 oder R14 gehören.

Für denjenigen, der die *AutoCAD*-Daten empfängt, ist es notwendig, die nicht vorhandenen Schriftarten auf seinen Rechner zu laden. Da die Fonts von *GENIUS* nicht geschützt sind, können diese Sonderzeichen-Schriftarten den Zeichnungen bei der Übertragung beigelegt werden. Wenn die zusätzlichen Schriftarten einmal auf dem Rechner des Empfängers installiert sind, können alle Zeichnung von *AutoCAD-GENIUS* einwandfrei angezeigt und gedruckt werden.

Wenn noch andere Schriftarten in der Zeichnung verwendet werden, die nicht zum Standard der Schriftarten in *AutoCAD* gehören, wird analog verfahren. Dies ist beispielsweise notwendig, wenn Schriftarten von alten *AutoCAD*-Versionen benutzt werden, wie *z. B.*: `ISO8.SHX`, `ITALIC8.SHX`, `SIMPLEX8.SHX`, `...`, `*8.TXT`.

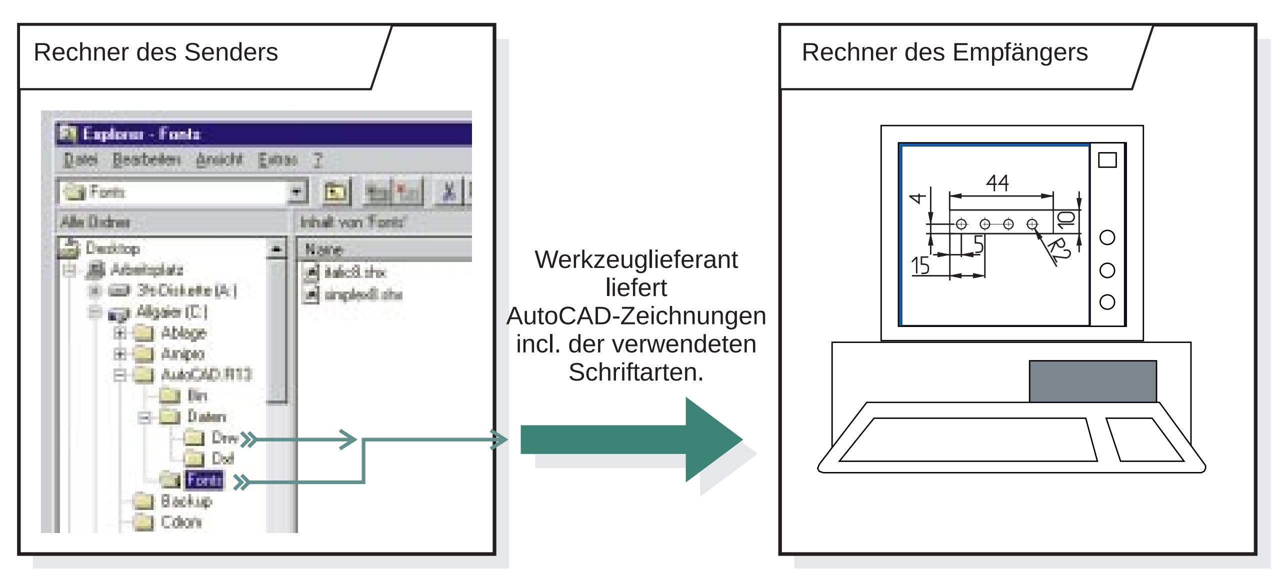


Abbildung 4-5: Verschicken von *AutoCAD*-Zeichnungen

Die Schnittkonturen, die für das Erstellen eines NC-Steuerprogramms zum Drahterodieren benötigt werden, lassen sich leicht und schnell vom Rest der Zeichnung isolieren, so daß hierbei nicht viel Zeit benötigt wird, was einer kleinen Prozeßstörung gleich käme. Um ein geeignetes

NC-Programm zu erstellen, kann ein DXF-File aus *AutoCAD* benutzt werden, das nur den Rand (Kontur) des Schnittstempels oder der –matrize enthält.

4.8 CAD-Handbuch des Lieferanten für Preß- und Schnittwerkzeuge

Zur Zeit verfügt der Lieferant über kein CAD-Handbuch. Für die Konstruktionen, die im Auftrag von Daimler-Benz ausgeführt werden, wird derzeit vom Lieferanten ein eigenes Handbuch erstellt, das auf dem CAD-Handbuch der Daimler-Benz aufbaut. Mit der Fertigstellung ist laut Leitung der Konstruktion nicht vor Ende des Jahres 1998 zu rechnen. Ein solches Handbuch soll den Konstruktionsabteilungen des Zulieferers eine einheitliche Vorgabe über die CAD-Modelle macht, wie es die bei Daimler-Benz das CAD-Handbuch mit seinen Normen tut.

4.9 Fazit

Die Daten, die bisher für jedes extern hergestellte Werkzeug mitgeliefert werden (NC-Programme, siehe Kapitel 4.4.1), sind für eine Prozeßkette Reverse Engineering nicht ausreichend, da NC-Programme nur auf der Bearbeitungsmaschine (Fräszentrum) funktionieren, für die die NC-Programme ursprünglich generiert wurden. Die NC-Daten, wurden für bestimmte Steuerungen von bestimmten Maschinen erstellt und sind nicht portabel.

Bei einem Datenverkehr von *AutoCAD*-Zeichnungen sollten die verwendeten Schriftarten, die nicht zur Standardinstallation von R13 oder R14 gehören, zumindest bei der ersten Versendung von Zeichnungen beigelegt werden. Wenn die fehlenden Schriften einmal beim Empfänger in das entsprechende Verzeichnis kopiert worden sind, tauchen keine Probleme mehr auf; vergleiche hierzu Abbildung 4-5.

Die CAD-Daten der Werkzeugoberfläche im *CATIA*-Format entsprachen in der Layerbelegung nicht den Anforderungen, die in der [MBN 10 059] festgelegt sind. Die Beschreibung der Layer ist ansonsten nicht kommentiert und enthält keine weitere Funktionserklärung der Einzelteile. Die CAD-Daten können in dieser Form nicht für eine schnelle Reproduktion der Werkzeugsegmente durch die Instandhaltung der Preßwerkzeuge verwendet werden. Durch entsprechende Rückfrage beim Werkzeuglieferanten oder beim Werkzeugsublieferanten könnten die Daten eventuell genutzt werden.

Das *CATIA*-Modell der Stempeloberfläche entsprach den Anforderungen, die an die Namensgebung und das *CATIA*-Startmodell (vergleiche 4.4.4) laut der Mercedes-Benz-Norm gestellt werden. Dies ist wahrscheinlich nur darauf zurückzuführen, daß die Entwicklungsabteilung dem Werkzeuglieferanten ein *CATIA*-Modell des Fertigteils zur Verfügung stellt. Innerhalb dieses Modells wurden vom Lieferanten die Werkzeugoberflächen konstruiert. Das Fertigteil von der Entwicklung war als Solid immer noch enthalten.

Eine DB-interne Richtlinie schreibt das Übertragen im prozeßsichereren EngDat-Protokoll schon für den Beginn des Jahres 1998 vor, aber viele Lieferanten haben heute noch nicht die technologischen Voraussetzungen, dieses Protokoll zu nutzen. Es bleibt abzuwarten, wie sich der neue Übertragungsstandard weiter durchsetzt.

Es sei noch abschließend erwähnt, daß es keine Daimler-Benz-weite Norm für *AutoCAD*-Zeichnungen oder deren Übertragung gibt. Die problematischen Parameter, wie verwendete Sonder-Schriftarten, müssen einzeln innerhalb einer Datenaustauschvereinbarung festgelegt werden.

Eine allumfassende Norm würde alle Probleme beseitigen, diese ist aber wegen der Vielfalt der CAD-Programme, der Zulieferer, der Produkte und der Bearbeitungsverfahren nicht zu realisieren. Es müssen spezifische Vereinbarungen zwischen den Austauschpartnern von CAD-Daten getroffen werden, die die kritischen Freiheitsgrade beim Erstellen und Übertragen einer Konstruktion und deren Dokumentation einschränkt.

Solche Vereinbarungen können in einer DAV festgehalten werden. Wenn bestimmte Regeln in solchen DAVs immer auftreten und nur selten Abweichendes vereinbart wird, sollten diese Regeln zum Standard werden. Sie sollten als Norm in das CAD-Handbuch für produktbeschreibende Daten aufgenommen werden.

5 Reverse Engineering

5.1 Begriffserläuterung und Abgrenzung

Von der ersten Idee eines Produktes über Design, Entwicklung, Konstruktion, Werkzeug- und Prototypenherstellung bis hin zur Serienproduktion, Instandhaltung und Reparatur wird immer wieder ein Zyklus zwischen physischen Objekten und ihrer virtuellen Beschreibung durchlaufen. Dieser Kreislauf wird in Abbildung 5-1 visualisiert. Änderungen können das Bauteil selbst oder das entsprechende Werkzeug betreffen, aber auch direkt im CAD-Modell durchgeführt werden. Die Änderungen, die sich auf physische Modelle beziehen, müssen wieder zurück in CAD-Beschreibung umgewandelt werden, damit immer gleiche Informationen vorliegen. Der Weg zur CAD-Beschreibung führt über das Digitalisieren und das Flächenrückführen. Wenn der aktuelle Stand des Werkzeugs oder des Bauteils nur im physischen Modell vorliegt, würde die Weiterentwicklung von Bauteilen und Werkzeugen auf einer nicht aktuellen Beschreibung beruhen und gleichzeitig einen Informationsverlust bedeuten. Es gingen die Informationen verloren, die das Bauteil und das entsprechende Werkzeug durch die verschiedenen direkten Änderungen enthalten.

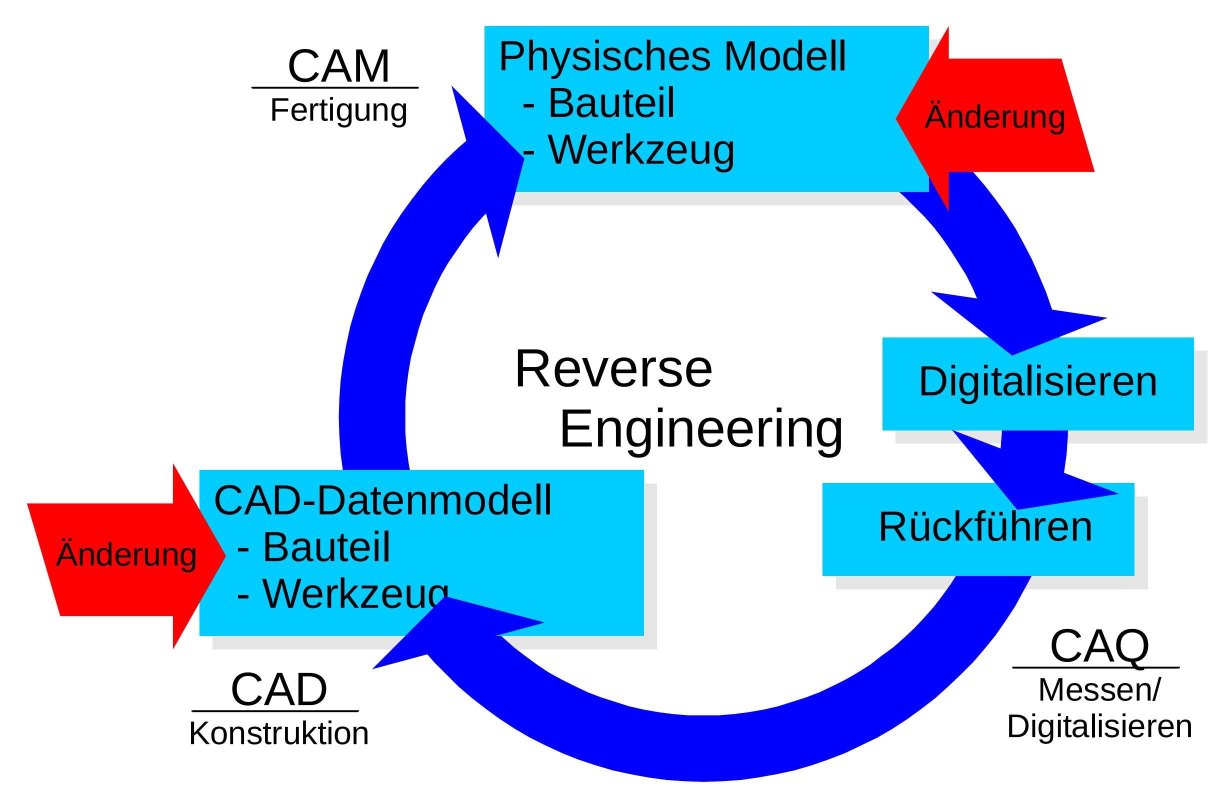


Abbildung 5-1: Kreislauf von Reverse Engineering

5.2 Reverse Engineering in der Instandhaltung

In der Instandhaltung für Preß- und Schnittwerkzeuge werden Werkzeuge benutzt, deren Geometrie nicht als CAD-Beschreibung vorliegt. Dies liegt daran, daß die Werkzeuge zum einen von externen Zulieferern von Werkzeugen kommen, die die Dokumentation nur in Papierform liefern müssen, und zum anderen werden Werkzeuge benutzt, zu denen nie eine CAD-

Beschreibung der Biegestempel existierte. Diese Werkzeugoberflächen referenzieren dann immer nur auf ein Kopiermodell.

Im Falle eines Drift- oder Spontanversagens des Werkzeugs muß die alte Geometrie wieder hergestellt oder reproduziert werden.

Wenn die entsprechenden Bauteile geändert werden sollen, müssen die jeweiligen Werkzeuge geändert werden. Größere Änderungen, von denen mehrere Operationen (Werkzeugstufen) betroffen sind, können nur mit CAD effizient und genau geplant und realisiert werden. Hierzu muß die Werkzeuggeometrie digitalisiert und in eine CAD-Beschreibung umgewandelt werden.

5.3 Einsatzgebiete und Anwendungsbeispiele von Reverse Engineering

Zur Zeit der Diplomarbeit wird die neue Technologie „Reverse Engineering“ in der Instandhaltungen der Prozeßketten des Werks 010 zwar noch nicht angewendet. Es wurden aber bereits Voruntersuchungen mit der Instandhaltung für Preß- und Schnittwerkzeuge durchgeführt, deren Ziel es war, die Machbarkeit einer solchen neuen Technologie nachzuweisen.

Mit den Methoden der Flächenrückführung können mit einem größeren Zeitaufwand CAD-Darstellungen von komplexen Modellen mit einer begrenzten Genauigkeit erzeugt werden, deren analytischer Aufbau in einem CAD-System zu zeitintensiv oder noch zeitintensiver als die Rückführung wäre. Flächenrückführung wird hier als sinnvolle Ergänzung zum CAD-System verstanden.

Weiterbearbeitung von den rückgeführten Flächen kann viele Ziele haben, wobei man hier klar trennen muß zwischen der Rückführung der Flächen von fertigen Bauteilen oder der entsprechenden Werkzeuge.

1. Die Entwicklung kann die rückgeführten Flächen von Bauteilen als Grundlage für die Konstruktion eines neuen Bauteils oder einer Bauteilvariante verwenden. Es können auch Objekte fremder Hersteller analysiert werden und als Ausgangsdaten für eigene Weiterentwicklungen dienen.
2. Es kommt vor, daß an einem vorhanden Bauteil Änderungen vorgenommen werden müssen, das entsprechende Werkzeug wird zu diesem Zweck digitalisiert, da die exakte Geometriebeschreibung in vielen Fällen nicht als CAD-Modell vorliegt. Die Änderungen werden an den rückgeführten Flächen vorgenommen, und aus den geänderten Daten können neue Werkzeuge gefertigt werden. Die vorhandenen CAD-Modelle können mit den rückgeführten Flächen auf den neuesten Stand gebracht werden.
3. Am vorhanden Produkt können einzelne, lokal begrenzte Änderungen durchgeführt werden, vergleiche Kapitel 5.3.1.
4. Die rückgeführten Daten werden im manchen Fällen nur als Dokumentation der vorhandenen Werkzeuge/Produkte benötigt. Aus diesen Daten können dann jederzeit Reproduktionen der Originale abgeleitet werden.

In den folgenden Unterkapiteln soll anhand einzelner Bespiele die Anwendung von Reverse Engineering-Verfahren erläutert werden:

5.3.1 Verarbeitung von Kopiermodellen

In der Schmiede des Werkes 010 der Daimler-Benz AG werden noch Kopiermodelle aus Holz verarbeitet. Diese Vorgehensweise ist eine Möglichkeit Reverse Engineering mit Kopiermodellen zu praktizieren, wobei das zugehörige Werkzeug immer im Einsatz ist.

Das im folgenden geschilderte Verfahren kann eingesetzt werden, wenn an einem Werkzeug Änderungen gemacht werden müssen. Die Änderung darf nicht sehr dringlich sein, und das Werkzeug sollte funktionieren und kann gleichzeitig in der Produktion ständig im Einsatz sein.

An einem Holzmodell dessen Vorlage 1:1 als CAD-Beschreibung existiert, werden von Hand mit Augenmaß und fertigungstechnischem Sachverstand geändert und in Stahl kopiergefräst. Wenn die Änderung erfolgreich war, das heißt wenn das Schmiedewerkzeug in irgendeiner Hinsicht „besser“ funktioniert, dann werden die Änderungsbereiche am Holzmodell digitalisiert, während das Werkzeug weiter benutzt werden kann. Die digitalisierten Flächen werden rückgeführt und das veraltete CAD-Modell wird mit diesen rückgeführten Flächen auf den neusten Stand gebracht. Neue Kopiermodelle in Holz werden dann aus den CAD-Daten erstellt. An diesen aufgefrischten Holzmodellen können dann zukünftig prototypische Änderungen getestet werden.

Die Abbildung 5-2 zeigt die Vorgehensweise einer Änderung am vorhandenen Werkzeug im Vorbetrieb: Schmiede. Ein Kasten stellt immer die vier Modelle dar:

1. CAD-Modell des Werkzeuges
2. Physisches Modell des Werkzeugs der Produktion
3. Physisches Modell aus Holz (ist zu Beginn identisch mit dem Werkzeug im Einsatz <2.>)
4. Modell des neuen Werkzeugs in der Vorbereitung

Der Vorteil dieser recht komplizierten Vorgehensweise ist, daß an einem im Einsatz befindlichen Werkzeug Änderungen vorgenommen werden können. Beim Schmieden ist der zeitliche Aufwand klein, der durch einen Werkzeugwechsel entsteht. Deswegen eignet sich dieses Verfahren speziell für den Vorbetrieb Schmiede. Bei der Blechbearbeitung ist ein Werkzeugwechsel zeitlich gesehen viel aufwendiger.

Der Bereich Schmiedegesenkbau (SCG), der für diese Werkzeuge zuständig ist, möchte in Zukunft keine Holzmodelle mehr verwenden. Durch den Einsatz von HSC-Fräsen und anderen Technologien soll auf einfachere Änderungsverfahren zurückgegriffen werden. Das HSC-Fräsen (Fräsen mit sehr hohen Schnittgeschwindigkeiten) ermöglicht das Fräsen der Werkzeuge direkt in Hartmetall, somit können Modelle vermieden werden.

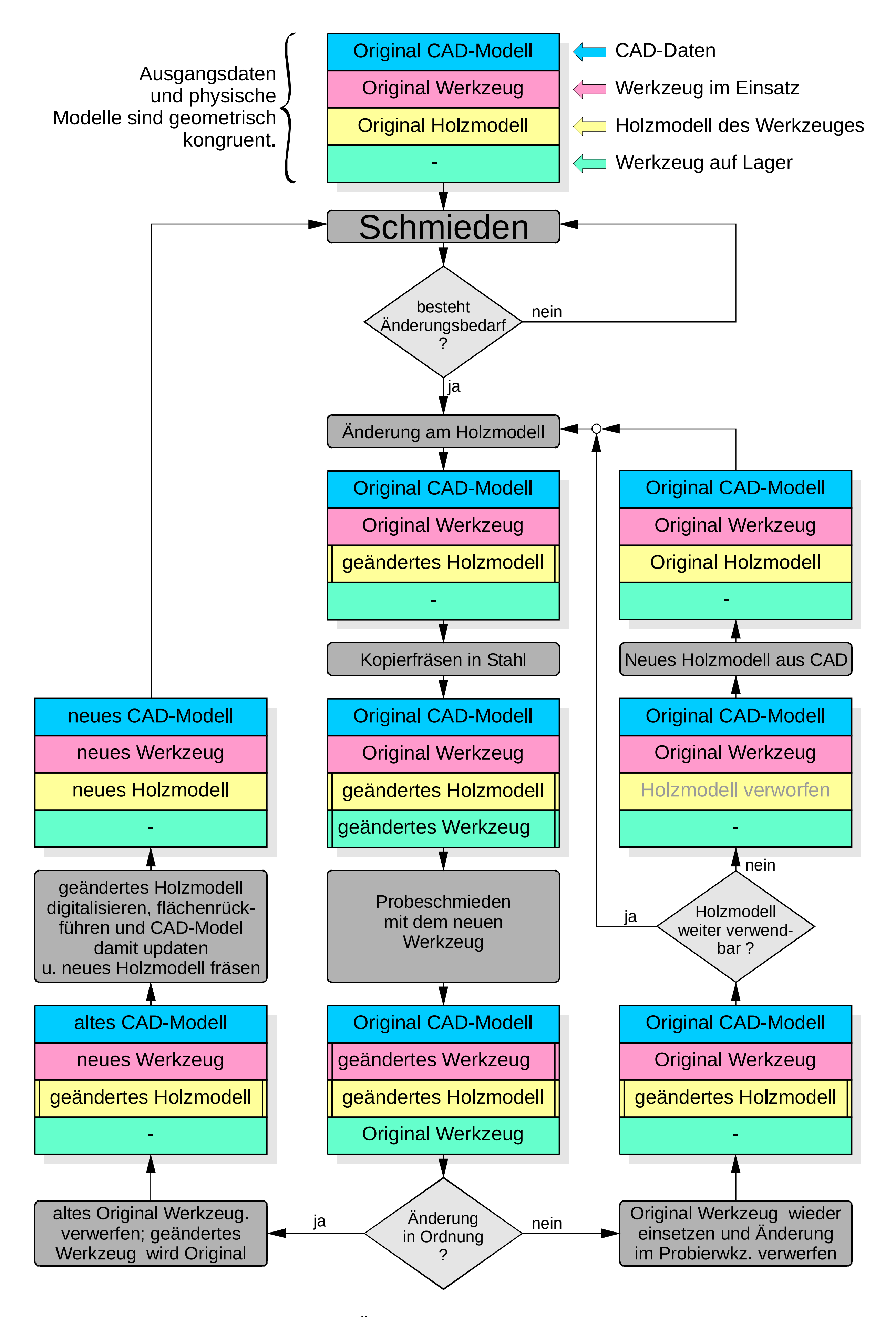


Abbildung 5-2: Vorgehensweise von Änderungskonstruktionen im Schmiedegesenkbau (SCG)

In manchen Bereichen der Industrie arbeiten Produktdesigner noch ohne CAD. Neue, prototypische Entwicklungen werden noch als handgemachtes Modell aus Modelliermasse oder Schaumstoff realisiert. Um die Formen im CAD weiterverarbeiten zu können, muß die manuell beschriebene Form digitalisiert und rückgeführt werden.

5.3.2 Verwendung eines Hybridmodells

Die Abbildung 5-3 zeigt ein Kopiermodell eines Preßwerkzeuges (Biegestempel) zum Umformen. Das bearbeitete Bauteil ist ein Federlenker, ein Blechbauteil an der Raumlenkerhinterachse eines Mercedes-Benz-Pkws. Im markierten Bereich soll eine Änderung durchgeführt werden.

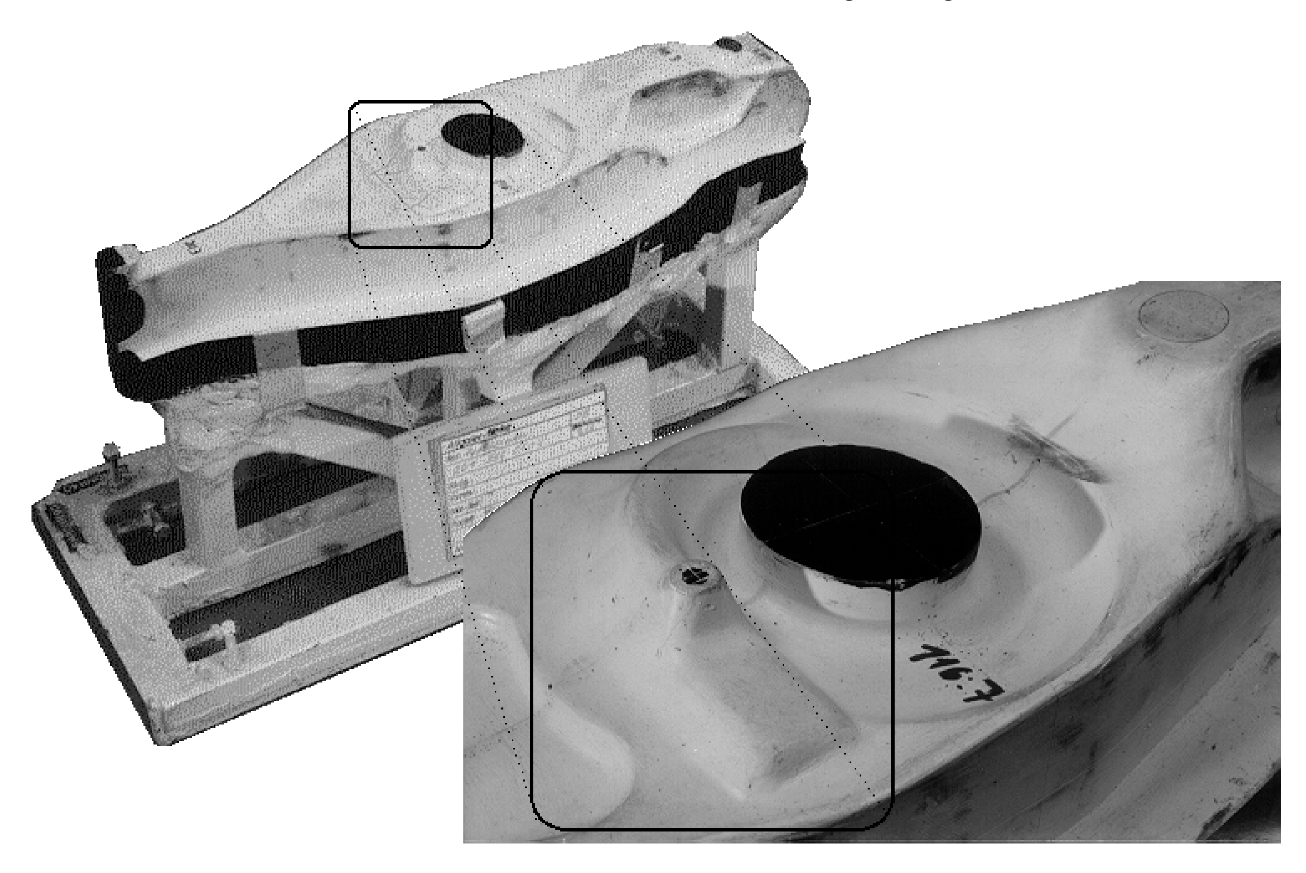
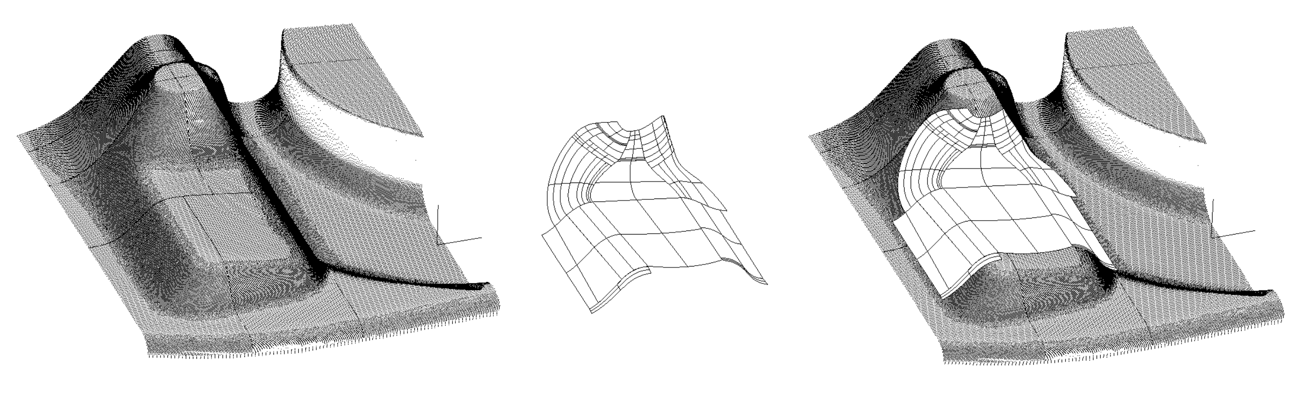


Abbildung 5-3: Änderungsbereich am Kopiermodell eines Biegestempels (Bauteil: Federlenker)

1. Im ersten Schritt wird der Änderungsbereich großzügig digitalisiert, die aufgenommene Punktwolke ist in der Abbildung 5-4, links, dargestellt.
2. Diese Punktwolke wird partiell im Änderungsbereich flächenrückgeführt und mit einer CAD-Software geändert, vergleiche Abbildung 5-4, Mitte.
3. Das geänderte Flächenmodell wird wieder in die Datei der Punktwolke zurückgespielt. Es entsteht eine Datei, die sowohl Punkte als auch Flächen enthält, ein Hybrid-Modell. Im Bereich der CAD-Fläche werden die Punkte gelöscht, weil diese größtenteils über der neuen Flächenbeschreibung liegen würden, vergleiche Abbildung 5-4, rechts.



Digitalisierte Punktwolke | Flächenrückgeführtes CAD-Modell mit Änderung | Hybridmodel (Punkte und Flächen)

Abbildung 5-4: Hybridmodellierung

4. Im letzten Schritt kann ein Hartmetalleinsatz für das alte Werkzeug gefräst werden, das NC-Programm wird auf der Basis des im dritten Schritt entstandenen Hybridmodells generiert.

Problematisch hierbei ist das Einpassen der CAD-Fläche in die Punktwolke. Weil der CAD-Flächenverband nicht die Ausmaße des Einsatzes hat, kann auf die Punktwolke nicht verzichtet werden. Diese Problematik tritt in der im Kapitel 5.3.3 geschilderten Anwendung von Reverse Engineering an Werkzeugen nicht auf.

5.3.3 Lokale/partielle Änderungen

In der Industrie tritt oft das folgende Problem auf: Auf der Basis eines schon vorhandenen Werkzeugs oder Bauteils sollen Änderungen durchgeführt werden. Wenn im gesamten Bereich Veränderungen notwendig sind, wie beispielsweise bei einer Veränderung der Größe, muß erst der gesamte Bereich digitalisiert und flächenrückgeführt werden, um danach konstruktive Änderungen im CAD vornehmen zu können.

Änderungen in kleinen Bereichen, die nicht das gesamte Objekt (Bauteil

/Werkzeug) betreffen, können im CAD durchgeführt werden, nachdem ein etwas größerer Bereich der Oberfläche flächenrückgeführt wurde. Der Rand der dabei entstandenen Fläche darf nicht verändert werden, um einen stufenlosen Übergang zu Änderungen zu realisieren.

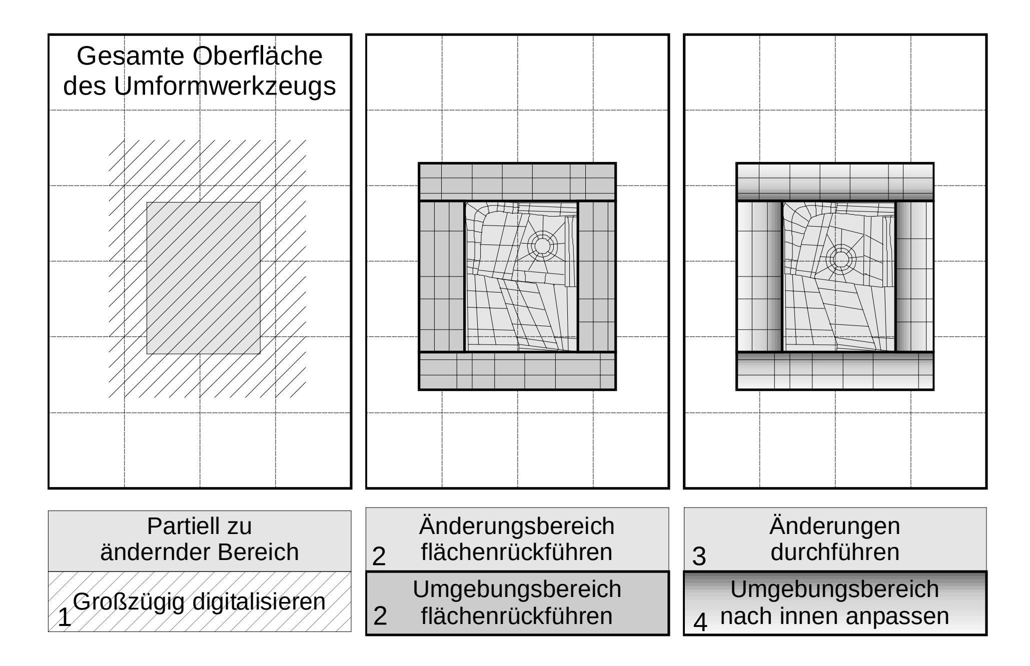


Abbildung 5-5: Ablauf einer partiellen Änderung in der Draufsicht

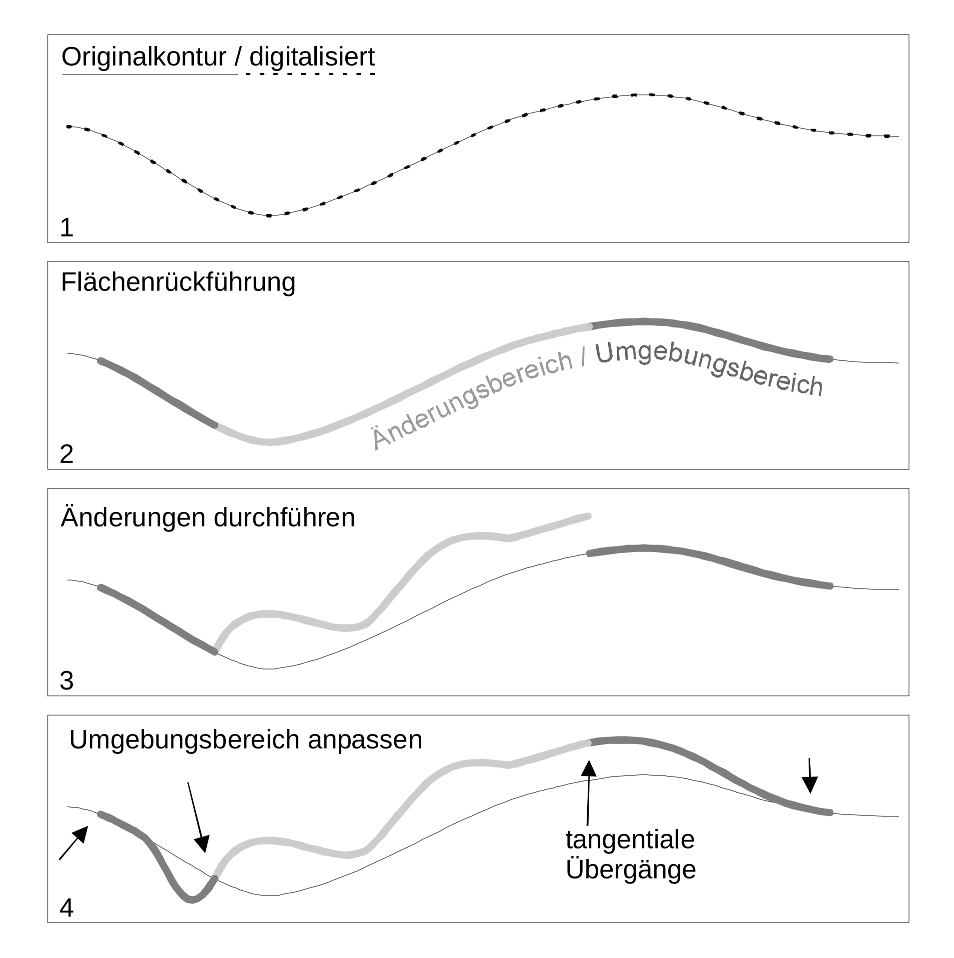


Abbildung 5-6: Ablauf einer partiellen Änderung in der Seitenansicht

5.4 Aufgaben der Instandhaltung

Die Aufgaben der Instandhaltung für Schnitt-, Stanz- und Preßwerkzeuge sind, die Produktionsanläufe zu begleiten, die Werkzeugsätze für Blechbearbeitung zu warten und

gegebenenfalls wieder instandzusetzen. In der Abbildung 5-7 ist das einzelne Werkzeug einer einzelnen Operation eines Preßwerkzeuges dargestellt. Als Werkzeug bezeichnet man die Menge aller Operationen, die zur Herstellung eines Blechbauteils benötigt werden.

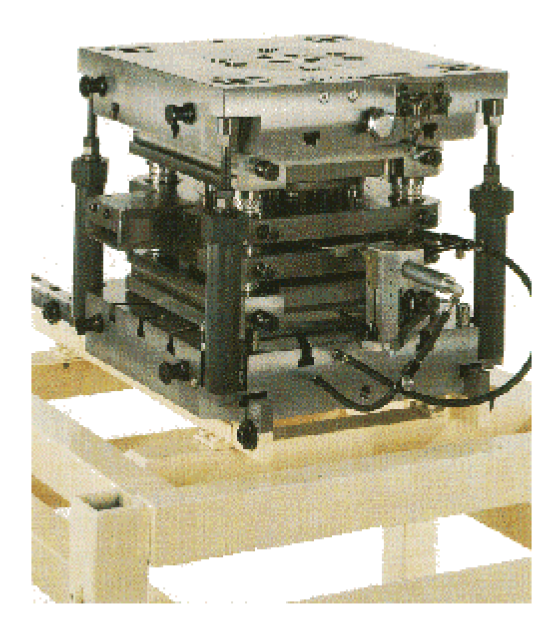


Abbildung 5-7: Operation (Stufe) eines Presswerkzeuges

Zur Zeit werden kleine Änderungen am Werkzeug, die die fertigungsbezogene Funktion des Werkzeugs betreffen, von der Instandhaltung meist selbst durchgeführt. Solche Änderungen, die das Bauteil an sich nicht betreffen, können im allgemeinen ohne Rücksprache mit der Entwicklung durchgeführt werden. In manchen Fällen werden die Änderungen vom Hersteller des Werkzeugs durchgeführt, also entweder vom internen Betriebsmittelbau (BMB) oder vom externen Lieferanten des Werkzeuges.

Änderungen, die sich auf das Bauteil auswirken, werden noch nicht von der Instandhaltung selbst durchgeführt. Alle anderen Änderungen werden mit der Entwicklung Pkw abgestimmt oder direkt von der Entwicklung initiiert. Der BMB führt die entsprechenden Änderungen am Werkzeug schließlich durch.

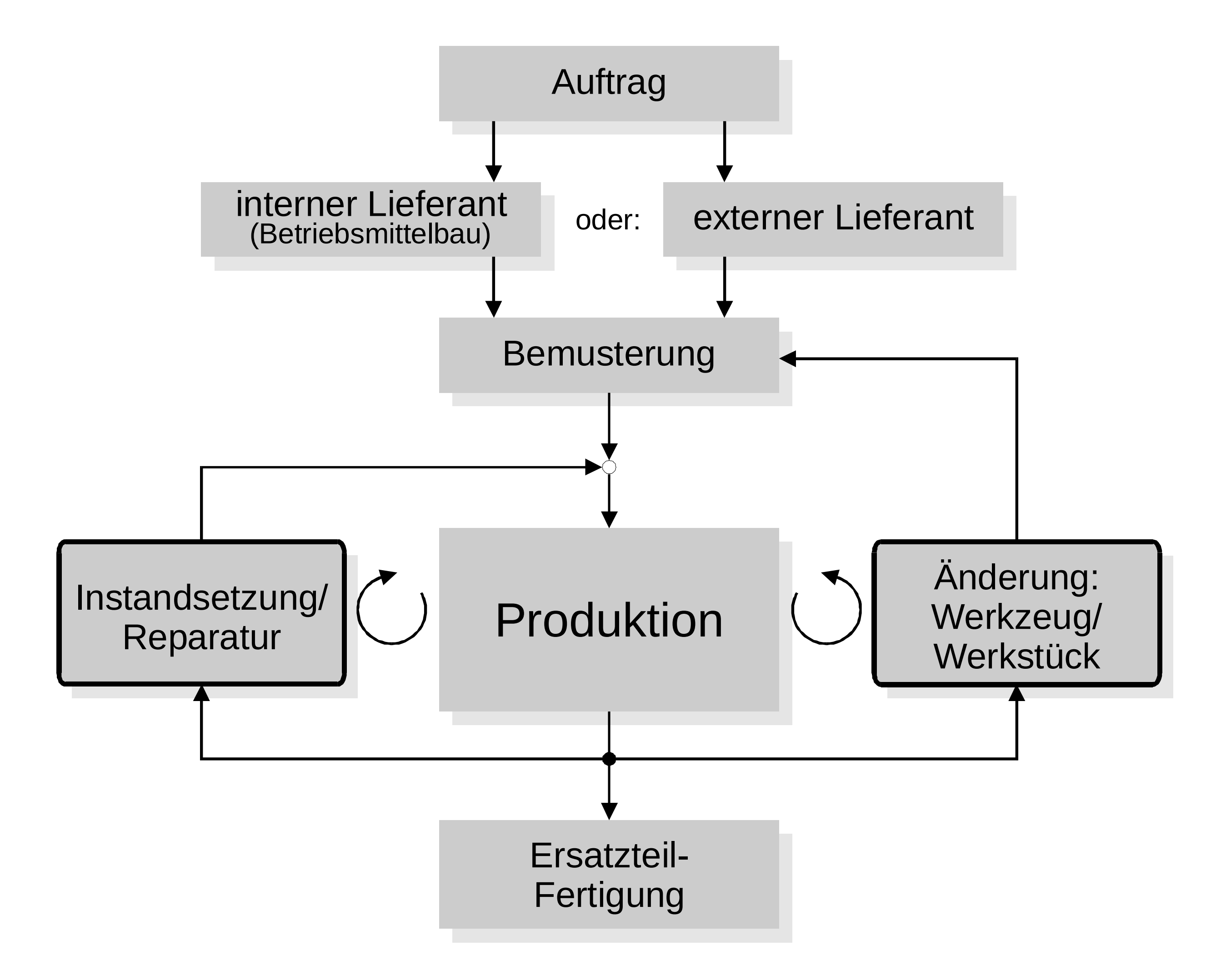


Abbildung 5-8: Aktuelle Aufgaben der Instandhaltung für Schnitt- und Preßwerkzeuge

5.5 Fazit

Die Technologie Reverse Engineering ist vielfältig einsetzbar und kann sowohl für partielle Änderungen von Bauteilen und Werkzeugen eingesetzt werden, als auch bei Änderungen, die den gesamten Bereich eines Bauteils/Werkzeugs betreffen.

Die Vorgehensweise, Design- oder Kopiermodelle in CAD-Beschreibungen durch Digitalisieren und Flächenrückführen umzuwandeln, ist sehr zeitintensiv und darum gilt es, wenn möglich, handgemachte Modelle aus Holz, Ton oder ähnlichem zu vermeiden. Werkzeuge können mit HSC-Technologie und simultanem Fünf-Achs-Fräsen in Zukunft direkt in Hartmetall gefräst werden. Das Generieren von NC-Steuerungs-Programmen ist noch problematisch. Das Angebot von Software, die diese Technologien unterstützen, ist noch sehr gering.

6 Digitalisieren

6.1 Allgemeine Begriffsdefinition

Unter Digitalisieren von Flächen versteht man das rechnergestützte, punktweise Erfassen der Oberfläche eines reellen Körpers. Ergebnisse sind üblicherweise 3D-Punkte, die das physikalische Objekt (teilweise) in Form einer oder mehrerer Punktwolke(n) beschreiben. Eine spezielle Anwendung ist das Digitalisieren von 2D-Konturen, wie sie beispielsweise bei Schneidkanten von Preßwerkzeugen vorkommen.

Beim Digitalisieren wird die Ist-Geometrie bezüglich eines beliebig wählbaren Koordinaten-systems erfaßt. Das Erfassen kann optisch (berührungslos) oder taktil (berührend) stattfinden. Die Punkte können zeilenweise oder ungeordnet erfaßt werden, dies hängt vom verwendeten Digitalisierverfahren ab.

Taktiles Digitalisieren liefert zeilenweise geordnete Punktwolken, wie die Laser-Digitalisierverfahren auch. Bildgebende, optische Verfahren zum Digitalisieren der Oberfläche erzeugen ungeordnete Punktwolken, da hier mehrere überlappende Aufnahmen vom selben Objekt kombiniert werden müssen. Die geordneten Punkte der einzelnen Aufnahmen mit verschiedenen lokalen Koordinatensystemen werden so zu einer ungeordneten Übermenge der Punkte aller Aufnahmen in einem globalen Koordinatensystem.

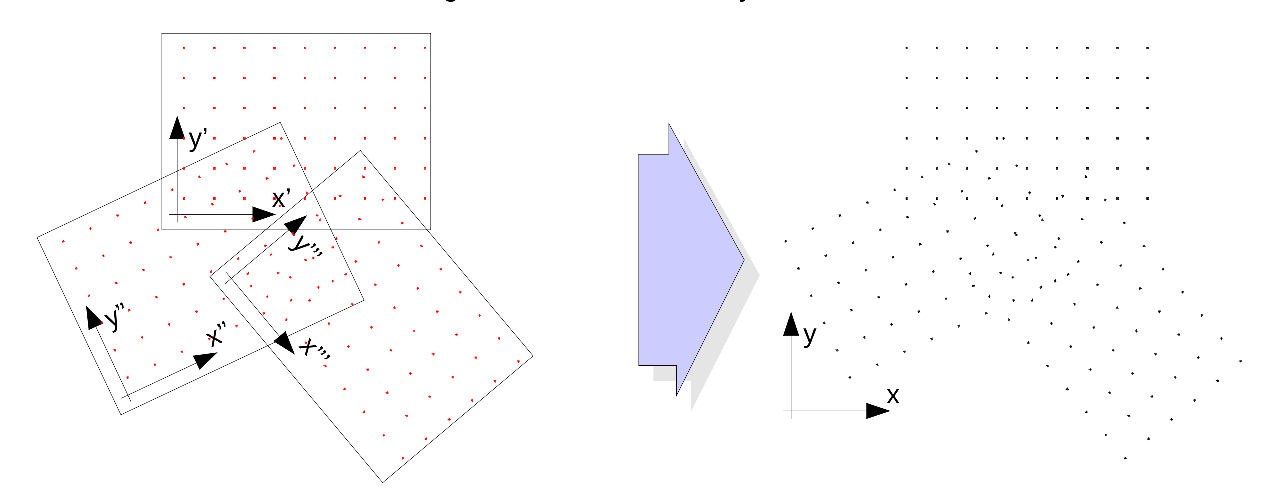


Abbildung 6-1: Aus geordneten Einzelaufnahmen wird eine ungeordnete Punktwolke

Im folgenden soll auf diese verschiedenen Technologien genauer eingegangen werden, wobei das optische Digitalisieren nicht von vornherein für den Einsatz in den Instandhaltungen der Vorbetriebe ausgeschlossen, sondern auf seine Einsatzfähigkeit hin analysiert wird.

6.2 Taktiles Digitalisieren

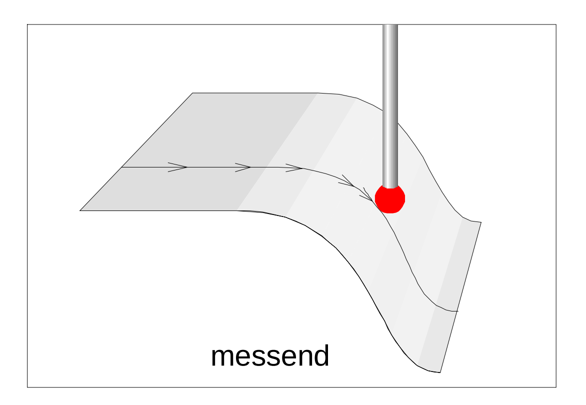
In der berührenden Digitalisierung kommen Koordinatenmeßgeräte, aber auch umgerüstete Kopierfräsmaschinen zum Einsatz. Es werden von verschiedenen Firmen, beispielsweise *FIDIA* oder *BCT*, Steuerungen für Dreiachsfräsmaschinen angeboten, um diese auf das Digitalisieren nachzurüsten; man spricht auch von „retrofitten".

In speziellen Digitalisiergeräten kommen messende (analoge) Taster zum Einsatz. Diese Taster messen während des schleifenden Kontakts (Abbildung 6-2) kontinuierlich die Auslenkung der

Tasterspitze und das Gerät rechnet diese gemessenen Größen in die Koordinaten der Tasteraufnahme ein.

Meßgeräte eignen sich aufgrund ihrer meist schaltenden (digitalen) Taster nur bedingt zum Digitalisieren von großen Flächen. Mit schaltenden Tastern muß jeder Punkt für sich erfaßt werden, vergleiche Abbildung 6-2. Das andauernde Verfahren senkrecht zur Fläche benötigt viel Zeit. Ein schleifendes und kontinuerliches Aufnehmen der Punkte ist nur mit messenden Tastern möglich.

Renomierte Hersteller von Koordinatenmeßgeräten (*Zeiss* und *Leitz*) setzen seit *ca.* 2 Jahren verstärkt messende Taster ein, wie *z. B.* das Produkt *VAST* von der Firma Zeiss. Zeiss verkauft das KMG *Prismo* fast ausschließlich mit *VAST* Tastköpfen. In Zukunft werden KMG prinzipiell zum Digitalisieren geeignet sein, aber es bleibt abzuwarten, ob sich der große Anschaffungspreis eines solch genauen Gerätes (G=2,0µm+L/300), vergleiche Gleichung 6-2) rechnet, wenn damit nur digitalisiert werden soll, oder ob beim digitalisieren eine solch hohe Genauigkeit der einzelnen Meßpunkte überhaupt notwendig ist.



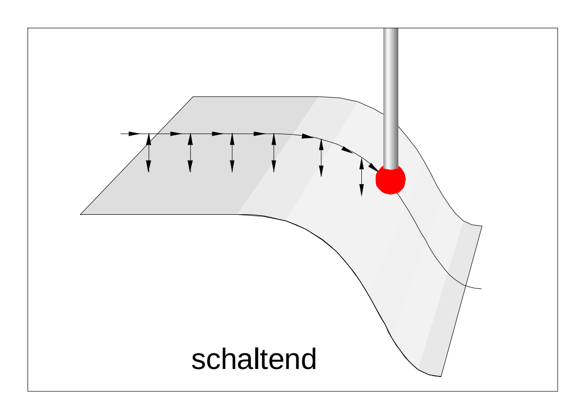


Abbildung 6-2: Digitalisieren mit analogem und digitalem Taster

Alle taktilen Systeme tasten ein Objekt ab, wobei sie nicht den exakten Berührpunkt mit der Oberfläche, sondern lediglich die Position des Tastkörpers messen. Diese sogenannten Tastermittelpunkte (oder aber auch Tasterspitzenpunkte) beschreiben die abgetastete Fläche nur indirekt. Am Anfang der Flächenrückführung aus berührender Digitalisierung steht daher die Tasterradiuskompensation, das heißt, die Berechnung von Daten der Originalfläche aus Mittelpunktdaten. Der Tastermittelpunkt ist in Abbildung 6-3 mit einem kleinen Kreis markiert. Der Vektor, der vom Tastermittelpunkt zum Berührpunkt auf der Oberfläche zeigt, ist immer dem Betrag nach gleich dem Radius der Meßkugel. Der Vektor ist aber durch die Aufnahme von Tastermittelpunkten in der Richtung unbestimmt.

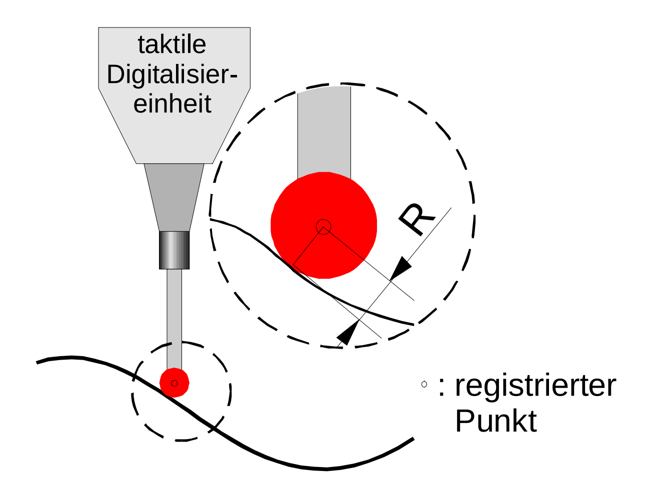


Abbildung 6-3: Taktiles Digitalisieren

Dies gilt auch analog zum Erfassen einer 2D-Kontur. Hierbei muß aber ein vergleichsweise geringer Aufwand getrieben werden, um von den digitalisierten Punkten, die nur in einer Ebene liegen, rechnerisch auf die Punkte der Originalkontur rückzuschließen.

6.2.1 Tasterarten

Je nach Topologie der Oberfläche werden verschiedene Taster benutzt. Am häufigsten kommen Kugeltaster zum Einsatz. Der Unterschied zwischen den beiden in der Abbildung 6-4 gezeigten Kugeltastern (1: Rubin; 2: Stahl) liegt im Kugelradius. Kugeltaster aus Stahl werden bis zu einem Radius von einem Millimeter hergestellt. Kugeltaster mit einem größeren Radius haben meist eine Tastkugel aus einem industriell hergestellten Rubin. Je größer die gewählte Kugel ist, desto mehr wird die digitalisierte Fläche geometrisch geglättet, vergleiche Abbildung 6-5. Die Oberflächenrauheit fließt dann weniger in die aufgenommenen Daten ein.

Schafttaster werden oft für 2D-Konturen verwendet, und Stichel können beispielsweise eine Prägung (Münze) digitalisieren. Die Digitalisierungsdaten von Sticheln liegen bereits auf der Oberfläche und benötigen keine Tasterradienkomensation, wie im Kapitel 6.2.2 beschieben.

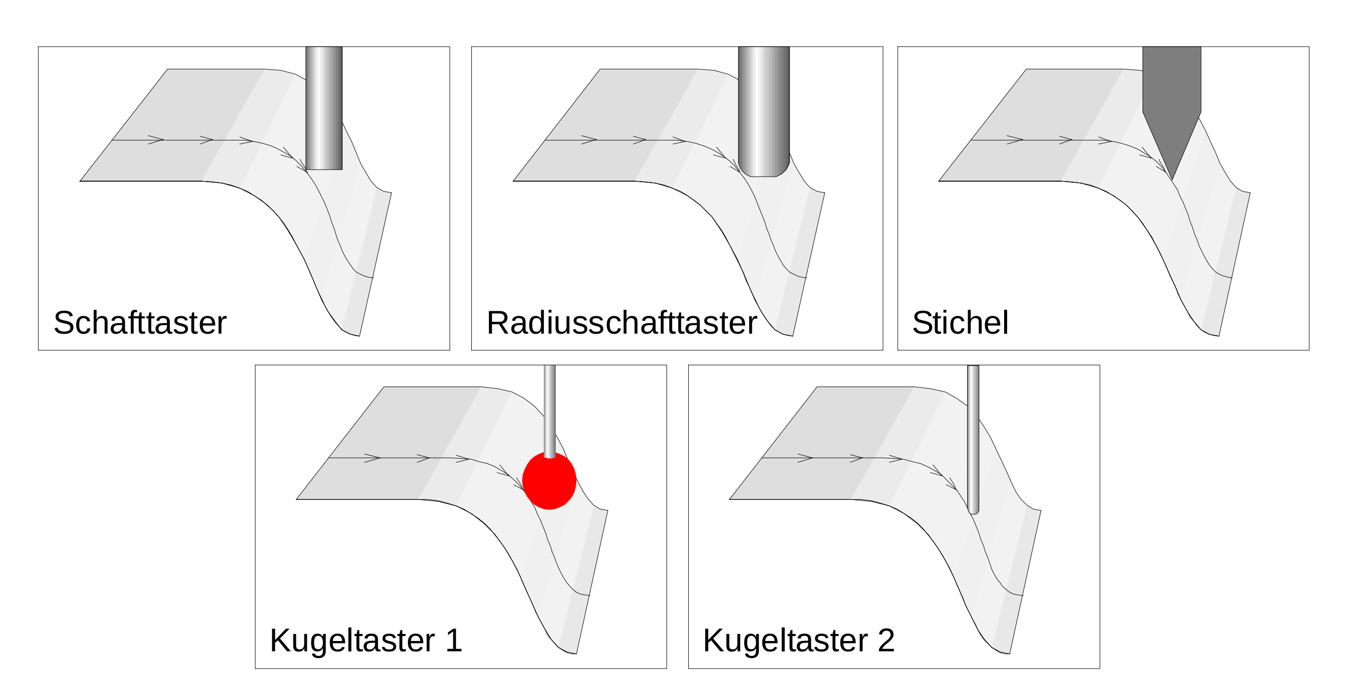


Abbildung 6-4: Verschiedene Tasterarten

6.2.2 Tasterradienkompensation (Rückrechnung auf die Nullgeometrie)

Die exakte Offsetberechnung

Bei einem idealen Kugeltaster bewegt sich der Tastermittelpunkt parallel zu der abgetasteten Oberfläche auf einer Offsetfläche. Bildet man nun von dieser Mittelpunktfläche einen Offset in entgegengesetzter Richtung, dann stimmt das Resultat weitgehend mit der Originalfläche überein. Abweichungen ergeben sich dort, wo in konkaven Bereichen der Krümmungsradius der Oberfläche kleiner als der Tasterradius ist, dies sollte in der Praxis aber nie vorkommen, da die Ergebnisse einer solchen Aufnahme einer Fläche unbrauchbar sind. Das vorgestellte Verfahren basiert auf der Idee der erneuten Offsetbildung in Gegenrichtung. Der Ausgangspunkt dieser exakten Offsetberechnung ist jeweils eine Triangulierung der gemessenen Tastermittelpunkte. [FrWe96]

Die Offsetfläche einer Triangulierung besteht aus planaren, zylindrischen und sphärischen Segmenten. Sie sind jeweils derjenigen Facette, Kante oder Ecke der Triangulierung zugeordnet, zu der sie den geringsten Abstand haben. Die prinzipielle Geometrie (Ebene, Zylinder oder Kugel) sowie die Lage eines Offsetsegments ergibt sich aus seinem zugeordneten Element; die genaue Ausdehnung ist durch die Schnittkurven des Elements mit angrenzenden Offsetsegmenten bestimmt. Zur Berechnung der Offsetgeometrie dient ein Offset-Sweep-Verfahren. Beginnend mit einem „sehr kleinen“ Abstand entfernt sich eine Offsetgeometrie kontinuierlich von der triangulierten Mittelpunktfläche.

Dabei ändert sich die Segmentstruktur der Offsetfläche nur in endlich vielen Ereignispunkten. Das Sweep-Verfahren überstreicht die Ereignispunkte in der Reihenfolge ihres Abstands zur Mittelpunktfläche. Ist die Mittelpunktfläche in Z-Richtung eindeutig projizierbar, dann weist die Offsetfläche zu keiner Zeit Selbstüberschneidungen auf. Diese Tatsache ermöglicht eine lokale, und damit effiziente Betrachtung bei der Suche nach potentiellen Ereignispunkten (Änderungs-punkten).

Der Hauptvorteil der exakten Offsetberechnung liegt darin, daß sie eine vollständige Beschreibung der digitalisierten Fläche liefert. Darüberhinaus läßt sich diese Beschreibung relativ kompakt gestalten:

Neben der triangulierten Mittelpunktfläche muß lediglich die Struktur der Offsetfläche gespeichert werden. Nachteilig fällt ein hoher Implementierungsaufwand ins Gewicht. Ein charakteristisches Merkmal für Offset-Sweeps von Mittelpunktflächen aus ist, daß degenerierte Fälle gehäuft auftreten, und daher im Algorithmus sorgfältig behandelt werden müssen.

Die Kopierfrässimulation

Verschiedene Programme zur Abtastdatenverarbeitung nutzen eine Kopierfrässimulation zur Tasterradiuskompensation. Dabei wird eine neue Menge von Punkten in der X-Y-Ebene mit einem definierten Rasterabstand verteilt und auf die Höhe: Z-Max gesetzt. Der simulierte Fräser (z. B. Kugelfräser) fährt die Digitalisierungsdaten virtuell nacheinander an. Gleichzeitig werden die Z-Werte der gerasterten Punkte auf eine maximale Höhe beschränkt, so daß sie nie innerhalb oder über dem simulierten Fräskörper liegen.

Nachteil: Durch die Gleichverteilung der neuen Punktwolke in der X-Y-Ebene, werden steile Kanten nur von einer sehr kleinen Anzahl von Punkten beschieben. Die Punktdichte an senkrechten Kanten ist Null.

Dieses Verfahren wird von den folgenden Programmen benutzt:

- *Trace* von *ReniShaw* und
- *scancad mill* von *BCT*.

6.2.3 Fehlerursachen beim taktilen Digitalisieren

Ergebnisse des taktilen Digitalisierens werden von vielen Fehlern überlagert, die in ihrem Einfluß unterschiedlich groß sind. Die Probleme resultieren überwiegend aus der Anpreßkraft des Tasters. [Kim87]

- Meßfehler aufgrund der Durchbiegung des Taststiftes;
- Verformung von langen oder dünnen Meßobjekten;
- Verformung der Meßoberfläche beim Antasten;
- Verformung des Meßobjektes durch die Ausfpannkraft;
- Verschleiß des Tasters;
- Meßfehler durch seitliche Abdrängung des Tasters bei räumlich gekrümmten Flächen;
- Meßfehler durch den Einfluß der unbekannten Reibung zwischen Taster und Oberfläche des zu digitalisierenden Objektes;
- ungenaue Rückrechnung vom Kugelmittelpunkt auf die Oberfläche.

6.2.4 Cyclone von ReniShaw

ReniShaw ist ein renomierter Hersteller von digitalen und analogen Tasteinheiten zum Messen in Koordinatenmeßgeräten mit dem Hauptsitz in Großbritannien. Davon abgesehen bietet die Firma *ReniShaw* auch ein Gerät zum Digitalisieren, die bei der Daimler-Benz AG in der Abteilung VEM schon seit über zwei Jahren im Einsatz ist.

Cyclone ist ein Digitalisiergerät, das speziell für die zügige Datenaufnahme von 2D- und 3D-Profilen entwickelt wurde. Die aufgenommen Daten können in der speziellen Software „*Trace Cut*“ manipuliert werden. CNC-Programme können berechnet werden, um Modelle zu reproduzieren. Die *Cyclone* wurde in Leichtbauweise konzipiert. Durch die Aluminiumstruktur ergeben sich geringe bewegte Massen. Dadurch können Profile bei hoher Geschwindigkeit genau gescannt werden.

Das Digitalisiergerät verfügt über einen Meßraum von 600x500x400 mm^3. Die maximale Abweichung an einer Meßkugel (Radius: 50 mm) beträgt laut Hersteller 50 µm. Kontrollmessungen haben ergeben, daß diese angegebene Abweichung 40 bis 50 % unterschritten wird. Desweiteren wurde im Rahmen der Diplomarbeit eine umfangreiche Untersuchung der Streuung der aufgenommenen Meßwerte durchgeführt. Dazu wurden geschliffene Endmaße und normale Werkzeugoberflächen sehr fein digitalisiert. Das zu erwartende Rauschen aufgrund der Rauheit und der Oberflächenbeschaffenheit wird in Abbildung 6-5 und der Gleichung 6-1 hergeleitet und kann aus Abbildung 6-8 abgelesen werden.

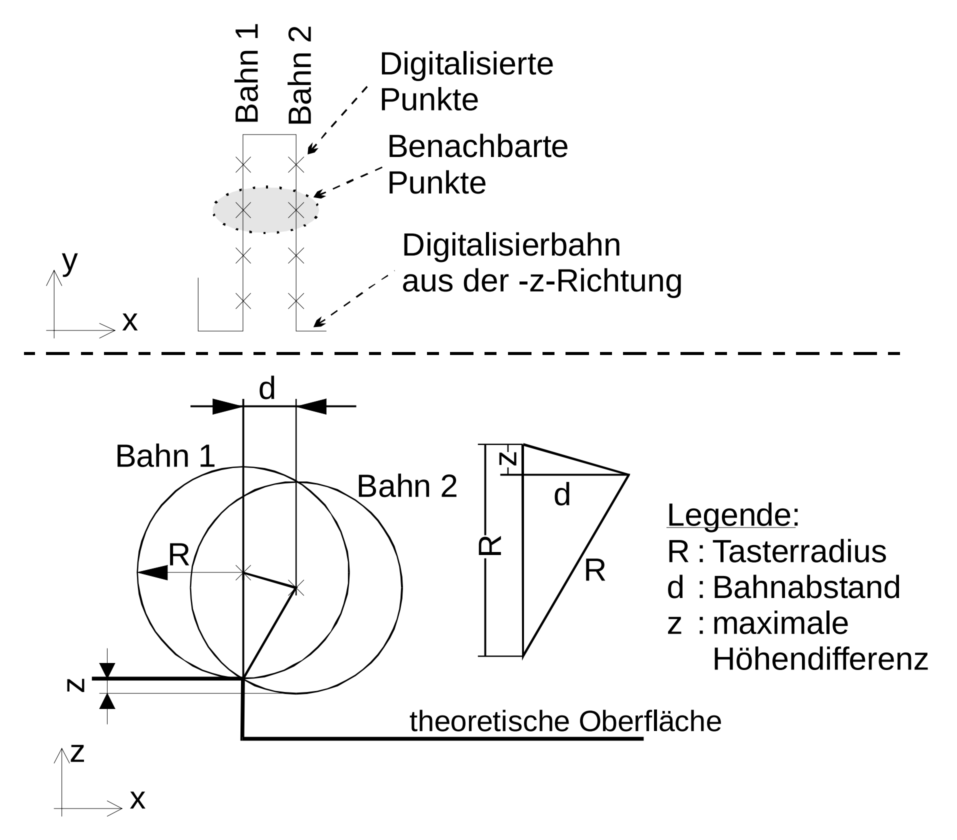


Abbildung 6-5: Skizze zur Berechnung der maximalen Höhendifferenz

Mit einem vorgegebenen Bahnabstand beim Digitalisieren (xy-Grid) können zwei benachbarte Punkte in zwei Digitalisierungsbahnen einen maximalen Abstand in z-Richtung haben, der vom Tasterradius R und dem Bahnabstand d bestimmt wird. Unabhängig von der Rauheit und der Topologie der Oberfläche beträgt diese maximale Höhendifferenz:

$$z = R - \sqrt{R^2 - d^2}$$

Gleichung 6-1: Maximale Höhendifferenz

Damit ist die maximal zu erwartende Streuung von Meßwerten aufgrund der Ist-Geometrie definiert. Die analysierten Datenreihen lieferten keine Streuungen, die die zu erwartenden Werte

überschritten. Die Lage der einzelnen Oberflächenpunkte der geschliffenen Endmaße lagen sehr nah an den theoretischen Werten. Es ergab sich eine Abweichung unter 10 µm.

Ein zweites Experiment untersuchte die Genauigkeit an einer ebenen Fläche. Ein geschliffenes Endmaß wurde windschief im Meßraum der Maschine positioniert und mit hoher Punktdichte digitalisiert. Mit dem der Flächenrückführ und Analyse *Surfacer* wurde in die erfaßten Punktwolke eine Regelgeometrie (Ebene) „gefittet“.

Die Digitalisierung wies die folgenden Parameter auf:

Eigenschaft:	**Wert:**
Bahnabstand:	0,5 mm
Digitalisierrichtung:	30° zur x-Achse
Digitalisiergeschwindigkeit:	6000 mm / min
Digitalisierstrategie:	bidirektional
Digitalisierkörper:	Kugel (R=1,5 mm)
Meßvolumen:	ca. 40x30x15 mm^3

Abbildung 6-6: Parameter der Digitalisierung

Die Analyse der Abweichung der gefitteten Ebene von den Punkten lieferte folgende Ergebnisse:

Analyse:	**Ergebnis**
Anzahl der Punkte insgesamt:	6947
Anzahl der Punktwolken:	1
Maximale positive Abweichung von der Ebene:	13,2 µm
Maximale negative Abweichung von der Ebene:	-16,8 µm
Punkte außerhalb einer Toleranz von ±10 µm:	Insgesamt 47 Punkte (Entspricht: 0,6748 % aller Punkte)

Abbildung 6-7: Ergebnisse des Punktwolken-Flächen-Vergleichs

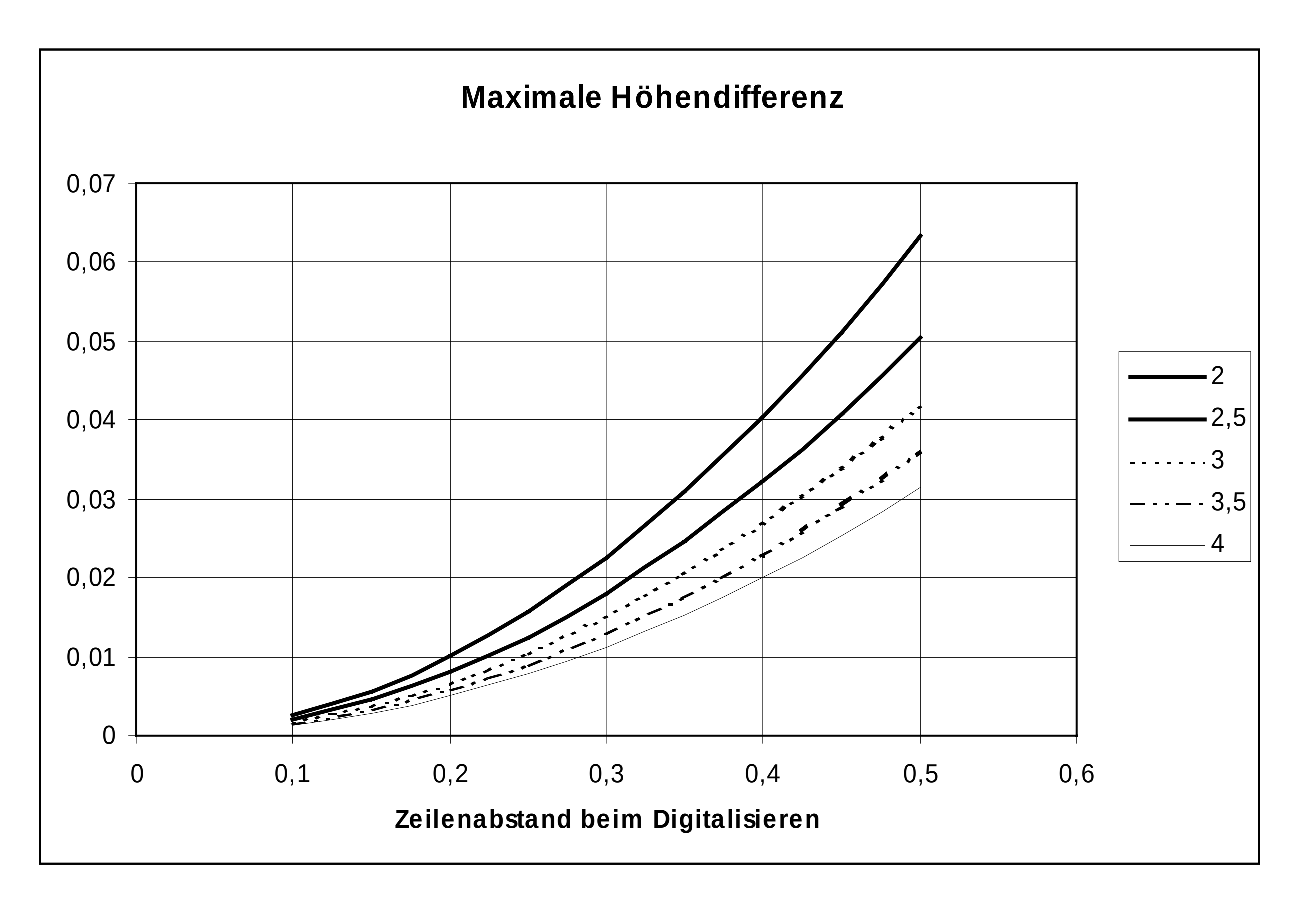


Abbildung 6-8: Schaubild der maximal zu erwartenden Höhendifferenz [in mm] zweier benachbarter Digitalisierungspunkte bei vorgegebem Bahnabstand [in mm] und Tasterradius [in mm]

6.2.5 scan machine

Digitalisiergeräte von der Baureihe „scan machine“ sind bewußt robust gehalten um den Einsatz in der Werkstatt zu ermöglichen. Es werden von der Firma *BCT* verschiedene Baugrößen angeboten, die für alle Objektgrößen geeignet sind. Wie auch bei der *Cyclone* von *ReniShaw* (siehe Kapitel 6.2.4) wird beim Aufbau mit Aluminium gearbeitet, dadurch müssen beim Digitalisieren weniger Massen bewegt werden.

Die Steuerungssoftware wird wie bei *ReniShaw* auch für Windows NT und Windows 95 angeboten, so daß ein werkstattorientierter Einsatz möglich ist. Außerdem erreichen die Digitalisiergeräte von *BCT* Genauigkeiten, die auch zum Messen geeignet wären (5 µm).

6.2.6 Vergleich

	Hersteller	ReniShaw	BCT		
	System	Cyclone	scan 500	scan 700	scan 1000
	Betriebssystem	Windows 95 seit 12.97 Windows NT ab 03.98	DOS seit 2 Jahren Windows NT ab 04.98		
technische Daten	*Meßvolumen*	600 x 500 x 400	500 x 400 x 400	700 x 550 x 400	1000 x 550 x 400
	Meßgewicht	200 kg (mehr, kostet mehr)	150 kg	650 kg	700 kg
	Genauigkeit	~50 µm (an der Kugel 50mm)	3 µm + 3,5 x l/1000		3 µm + 4 x l/1000
	Auflösung	5 µm	1 µm		
	Regelgeometrie-messung	nein	nein		
sonstiges	*Schulungs-aufwand (incl.)*	Digitalisieren: 1 Tag NC-Programm erstellen: 2 Tage	3 Tage Inbetriebnahme und Schulung		
	Erfahrung im Daimler-Benz Werk 010	~zwei Jahre Einsatz in der VEM	nur Prospektwissen		

Abbildung 6-9: Vergleich zweier Hersteller von Digitalisiergeräten

Die Genauigkeit (G) der Geräte von der Firma *BCT* wird mit der Formel beschrieben, mit der auch die Genauigkeiten von Meßgeräten beschrieben werden:

$$G = a + b \cdot \frac{l}{1000}$$

Gleichung 6-2: Genauigkeit von Meßgeräten

	Parametererklärung	Einheit
G	Maximaler Fehler des gemessenen Abstandes zwischen zwei Punkten	[µm]
a	Das konstante, maximale Fehlerglied, das bei jeder Messung auftritt	[µm]
b	Der relative Fehler, der bei einer Messung eines zweiten Punktes in das Ergebnis einfließt	[-]
l	Der Abstand der beiden Werte, die aufgenommen wurden	[mm]

6.2.7 Zusammenfassung

Die Technologie des taktilen Digitalisierens beruht auf einer Weiterentwicklung von Koordinatenmessung auf Koordinatenmeßgeräten. Es wird eine andere Steuerung, ein angepaßter analoger Meßkopf und eine spezielle Auswertsoftware benutzt. Durch den Einsatz bewährter Technologien ist das Digitalisieren mit taktilen Mitteln gut beherschbar und sehr störungssicher. Man spricht hierbei auch von einem prozeßsicheren Verfahren. Steil abfallende Bereiche, wie sie bei Gesenken oder prismatischen Objekten vorkommen, können problemlos digitalisiert werden.

Der Markt bietet mehrere Spezialsysteme für diese Anwendung, deren Preis in erster Linie von der jeweils angegebenen Genauigkeit und den Abmessungen des Meßraums abhängig ist. Die Hersteller bieten verschiedene Meßvolumina an, so daß je nach gefordertem Digitalisiervolumen eine andere Ausführung eines Digitalisiergeräts beschafft werden kann.

Wenn ein Digitalisiergerät nur zur Aufnahme von Werkzeuggeometrien (Flächen und Kanten) benutzt wird, die nachträglich gefräst oder rückgeführt werden müssen, hängt die erforderliche Genauigkeit von der Aufgabe des digitalisierten Werkzeugs ab. Bei den meisten Freiformflächen ist eine Genauigkeit im Bereich 5 Hundertstel Millimeter ausreichend (genaueres hierzu in Kapitel 3.6).

Die Digitalisierungsdaten der *Cyclone* haben diese Genauigkeit erfüllt, obwohl die Genauigkeit mit 50 µm angegeben ist. Die anwendungsbezogenen Tests haben ergeben, daß die Streuung, Genauigkeit und Auflösung deutlich unter den angegebenen Werten liegen.

Die *Cyclone* erfüllt alle Genauigkeitsanforderungen für das Reverse Engineering. Eine Ausnahme sind 2D-Schnittkonturen, die im Bereich des Feinschneidens auf 5 bis 10 µm genau gefertigt werden müssen.

6.3 Optisches Digitalisieren

Als Hauptmerkmal des Digitalisierens mit optischen Mitteln gilt die berührungslose Aufnahme der einzelnen Punkte der Oberfläche. Dies macht das Erfassen sehr nachgiebiger Werkstoffe wie Modelliermasse, Ton, Wachs und Schaumstoff möglich.

Das optische Digitalisieren ist aber nur eine Anwendung unter vielen berührungslosen „Antastprinzipien“. Zum Digitalisieren sind induktive, akustische, kapazitive und pneumatische Verfahren aber weniger geeignet [Kim87]. Diese Verfahren sind entweder nicht zum Digitalisieren verwendbar, weil die Auflösung zu gering ist oder weil die Ergebnisse nicht die geforderte Genauigkeit aufweisen.

Innerhalb der Daimler-Benz AG wird an der Thematik des optischen Messens und Digitalisierens vor allem im Werk Ulm intensiv geforscht. Alle internen Forschungs- und Entwicklungsbereiche, die sich mit dieser Thematik beschäftigen, sind unter der Bezeichnung „OptoForm“ zusammengefaßt.

6.3.1 Unterscheidungsmerkmale optischer Systeme

Optische Digitalisierverfahren lassen sich in drei Klassen einteilen. Hierbei ist der Begriff „Klassen“ bewußt gewählt, da sich die Verfahren um ein bis zwei Größenordnungen in der Geschwindigkeit der Punktaufnahme unterscheiden.

Punktweises Laserdigitalisieren (vergleiche Abbildung 6-10) kommt den taktilen Digitalisierverfahren am nächsten. Eine spezielle Abtastsoftware erlaubt die Steuerung eines Koordinatenmeßgeräts, in dem statt des Tastkopfes eine Meßoptik eingebaut ist. Diese Optik nimmt die Oberfläche Punkt für Punkt in Streifen auf.

Das ***streifenförmige Digitalisieren*** wird auch meistens unter Zuhilfenahme eines Lasers eingesetzt (vergleiche Abbildung 6-10). Der Laserstrahl wird über einen Spiegel linear über das Objekt hin und her bewegt, so daß auf der Oberfläche eine projizierte Zeile entsteht. Diese wird meist von einer digitalen Kamera aufgenommen und von einer Analyse-Software ausgewertet. Die 3D-Punkte auf diesen eingelesenen Zeilen werden nach einer Glättung zu Splines

verbunden. Viele solche Splines können als Eingangsinformation für eine Loft-Operation im CAD dienen. Dieses Verfahren hat sich vor allem im Designbereich bewährt, in dem relativ einfache und stetige Formen zu digitalisieren sind.

Es gibt eine Reihe von verschiedenen ***flächigen Digitalisierverfahren*** (vergleiche Abbildung 6-10), die mit CCD-Kameras Modelle in mehreren Teilansichten sehr schnell flächig digitalisieren. Die zur Zeit vorliegenden Benchmarkergebnisse zeigen, daß in den letzten Jahren bei den bildgebenden Systemen große Fortschritte gemacht wurden. Die Digitalisierdaten sind aber noch immer, abhängig von Modell und System, von sehr unterschiedlicher Qualität. [Brem96]

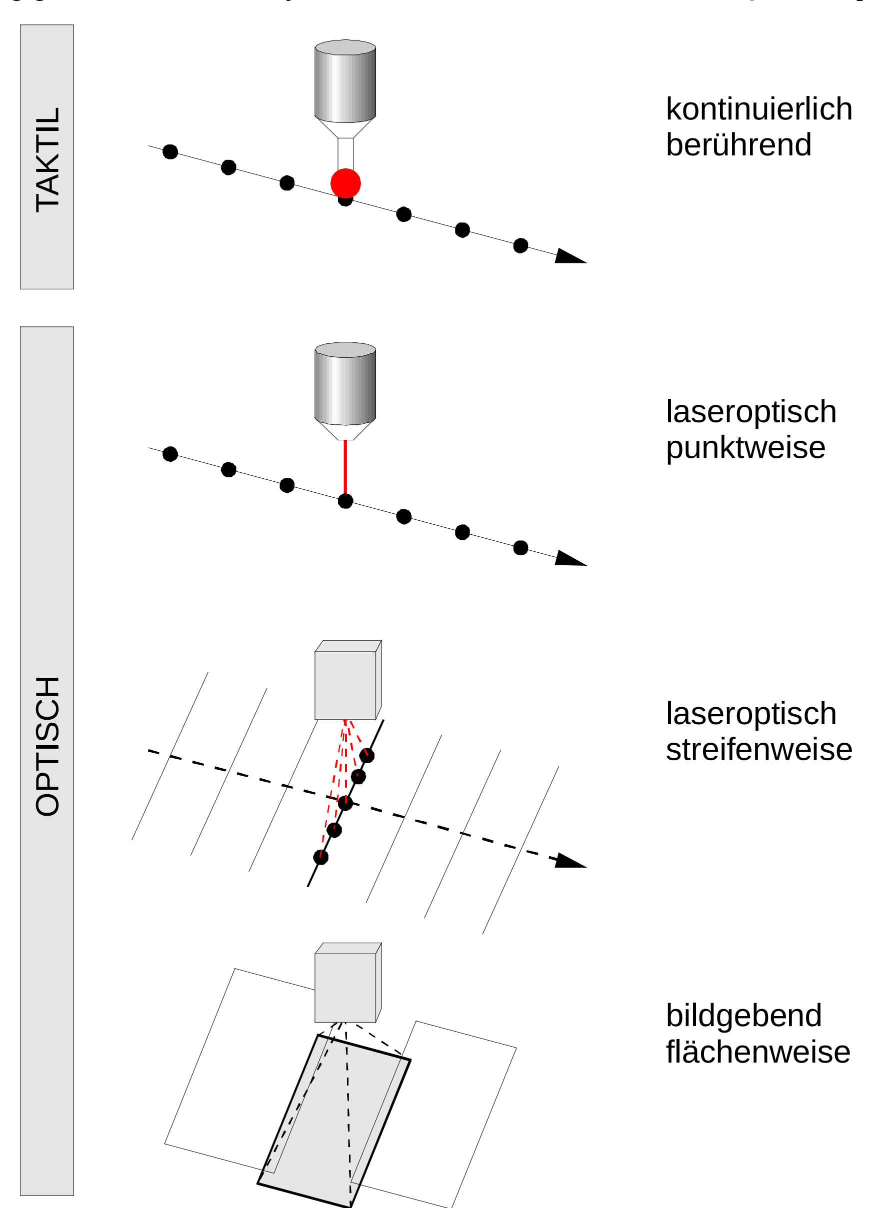


Abbildung 6-10: Meßverfahren für das 3D-Digitalisieren [Brem96]

Die unter dem Begriff optoelektronische Verfahren zusammengefaßten optisch scannenden und bildgebenden Digitalisiersysteme zeichnen sich durch eine sehr hohe Digitalisiergeschwindigkeit aus. Bei den bildgebenden Verfahren sind Abtastraten im Bereich 5000 bis 10000 Punkte pro Sekunde möglich. [Fri96]

6.3.2 Allgemeine Meßprinzipien

Die Güte der Meßergebnisse optischer Verfahren ist stark von der Oberfläche des zu scannenden Objektes abhängig. Glänzende oder gar spiegelnde Oberflächen lassen sich nur schwer optisch vermessen. Abhilfe kann ein Spray zum Weißen (Weißmachen) der Oberfläche schaffen.

Sehr steile Flächen (nahezu parallel zur Meßlinie) verursachen Teilreflektionen und führen zu Meßfehlern. Eine Änderung der Lage des Objekts relativ zum Meßstrahl führt oft zur Abschattung von Bereichen des Digitalisierungsobjektes.

Im folgenden sollen die gängigsten Verfahren zum optischen Erfassen von Oberflächen vorgestellt werden.

6.3.2.1 Punktweise Laserverfahren

In den meisten handelsüblichen Koordinatenmeßgeräten (KMGs) können nicht nur taktile Meßeinheiten benutzt werden. Der taktile Meßkopf kann durch einen Lasermeßkopf ersetzt werden, der eine feste, geeichte Brennweite besitzt (*z. B.* geeichte 40,000 mm). Die zu erfassende Oberfläche wird, wie beim taktilen Digitalisieren, zeilenweise bidirektional, das heißt im Pendelbetrieb, abgefahren.

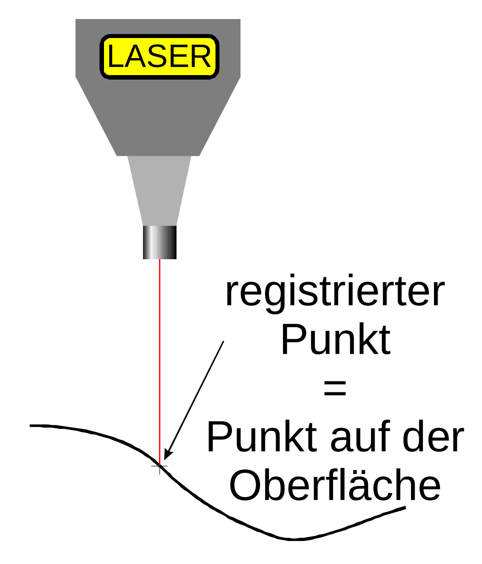


Abbildung 6-11: Laserfokusierverfahren

Dieses Verfahren ist nicht mit der Laserinferometrie zu vergleichen. Die Inferometrie hat eine Meßunsicherheit bis in den Nanometerbereich, und wird auch zur Kalibrierung und Justierung präziser Maschinen benutzt. Für die Messung muß auf der Meßfläche eine Spiegelebene fixiert sein. Aus diesem Grund scheidet die Inferometrie als optisches Meß- und Digitalisierungsverfahren meist aus.

Steil abfallende Geometrien sind ab ~85° aus der Horizontalen gar nicht mehr oder nur noch sehr ungenau meßbar. Einerseits kommt es bei solchen Flanken manchmal zu einer Totalreflektion, andererseits kann kein exakter Punkt mehr projiziert werden. Die Ausdehnung des projizierten Laserstrahls ist endlich und damit wird bei steilen Flanken eine sehr gestreckte Ellipse projiziert, die dann aufgrund ihrer Entartung nicht mehr fokusiert werden kann.

Das Erfassen solcher Flanken ist meßtechnisch nicht erfolgversprechend und behindert außerdem das Vorankommen des Digitalisierungsprozesses. Der Laser versucht an solchen

Stellen, den Meßpunkt vergeblich zu fokusieren. Allein die Fokussier-Versuche benötigen zudem viel Zeit. Aus diesem Grund sollten steile Kanten beim Digitalisieren mit diesem Verfahren immer ausgespart werden.

In der Literatur wird diese Sensorart auch als *mikrooptischer Fokussensor* bezeichnet. Das Verfahren heißt im Englischen *Range from Focus*.

6.3.2.2 Triangulation

Ein ähnliches Verfahren ist die **rotationssymmetrische Lasertriangulation**, hier wird auch ein Laser in einem herkömmlichen KMG mit einer besonderen Steuerung benutzt. Der Unterschied liegt im Verfahren zum Einpegeln des Abstandes vom Laser bis zur Oberfläche. Rein äußerlich ist das Verfahren für den Laien nicht vom Fokussierverfahren zu unterscheiden, da die Meßeinheit fast gleich aussieht und die Steuerung die Meßeinheit immer auf den gleichen Abstand vom Meßobjekt regelt.

Dieses Verfahren wird ebenfalls mit einem speziellen Meßkopf auf einem KMG durchgeführt. Für die Triangulation ist ein rotationsförmiger Bildwandler notwendig. Diese Technologie findet beispielsweise im Digitalisiergerät: *scan machine laser* von der Firma *BCT* seine Anwendung.

Die **Laser-Triangulation** ist vom Prinzip her die einfachste Methode der optischen 3D-Meßtechniken auf der Basis der Triangulation. Mittels eines Lasers wird ein Lichtpunkt auf das Meßobjekt projiziert. Das vom Objekt reflektierte Licht wird auf einem positionsempfindlichen Detektor abgebildet. Aus der Geometrie des optischen Aufbaus (Längen b und d) sowie dem gemessen Winkel ϑ zwischen Beleuchtungs- und Betrachtungsrichtung errechnet sich anhand von Triangulation die Lage des betrachteten Objektpunktes. Für den in Abbildung 6-12 dargestellten Fall der senkrechter Beobachtung gilt:

$$d = \frac{b}{\tan \vartheta}$$

Gleichung 6-3: Abstand (d) vom Sensor

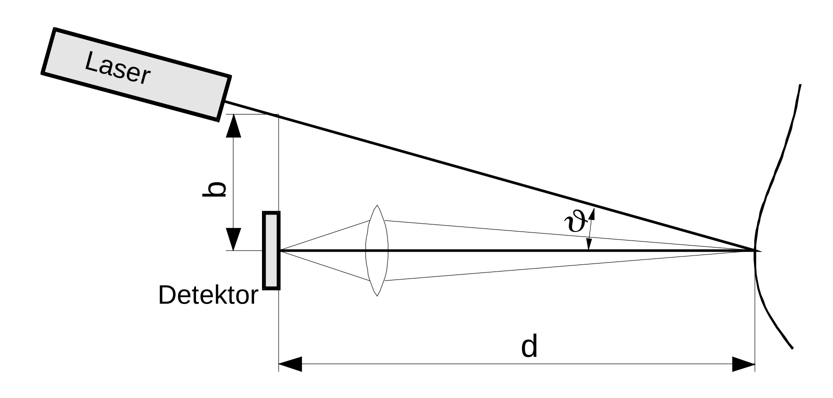


Abbildung 6-12: Verfahrensprinzip der Laser-Triangulation

Der Übergang vom punktweisen zum bildgebenden 3D-Meßverfahren ist aus den bisherigen Ausführungen direkt abzuleiten: Ermöglicht die punktweise Beleuchtung eine punktweise 3D-Vermessung, so entspricht das bei der gezielten flächenhaften Projektion einer bildhafte Triangulation der beleuchteten Meßszene.[Breu93]

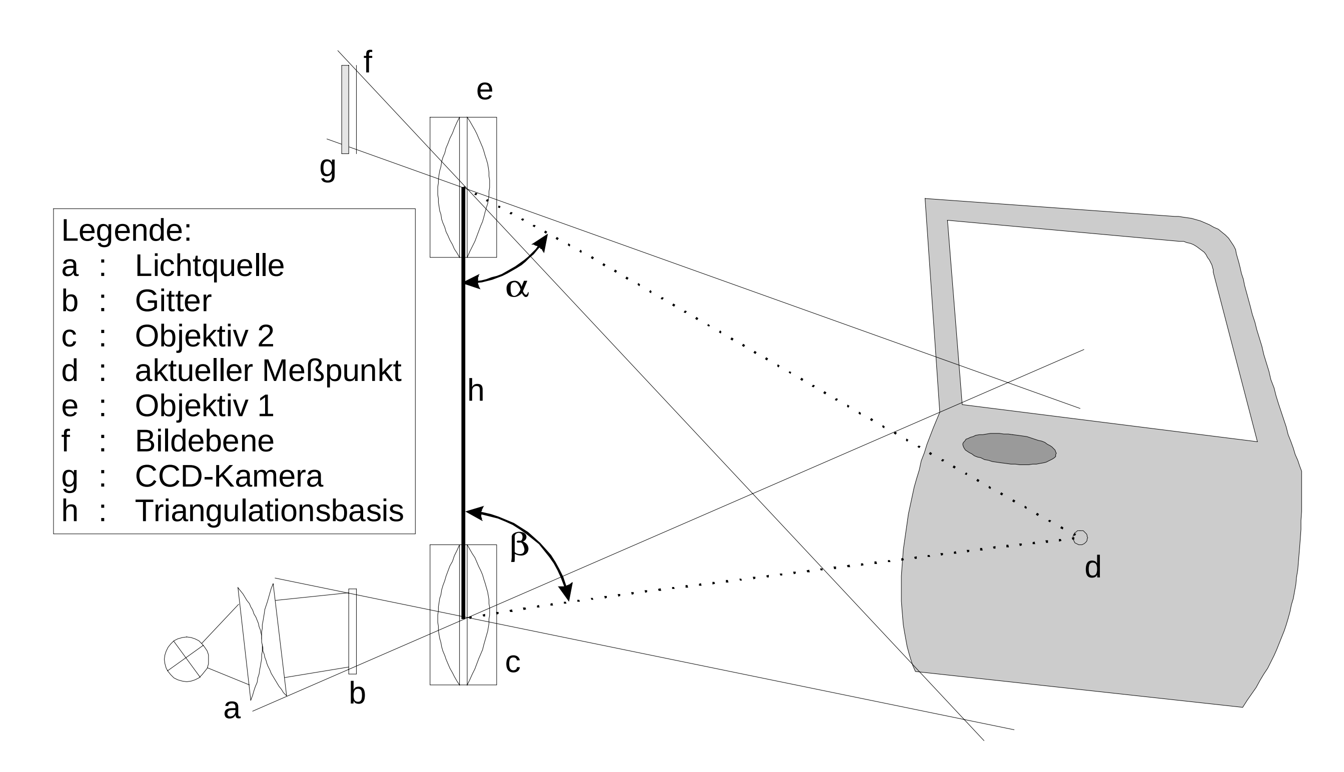


Abbildung 6-13: Prinzip der Triangulation für das flächenhafte optische Digitalisieren [Wei95]

Ein Spezialprojektor bildet ein Gitter auf der Oberfläche des Meßobjektes ab, welches gleichzeitig von einer CCD-Kamera aufgenommen wird (Abbildung 6-13). Entsprechend der Oberflächengestalt erscheint das Gitterbild verformt. Diese Deformation enthält die für die folgende Rechnerauswertung notwendigen Informationen zur flächendeckenden Bestimmung der Objekttopographie. Kamera und Projektor haben dabei einen festen Abstand und konstanten Winkel zueinander. [Mic97]

Aus diesem Punkt folgt sofort der größte Nachteil dieses Verfahrens; denn die Führung, Positionierung und Aufhängung der Objektive muß sehr genau sein, um hier nicht einen großen und alles überlagernden Meßfehler zu verursachen.

6.3.2.3 Photogrammetrie

Die Photogrammetrie nutzt das Prinzip der Triangulation. Ein Objekt wird aus mehreren Richtungen simultan betrachtet [Rich93] und muß nicht wie bei anderen Meßsystemen, *z. B.* Theodolitmeßsysteme, sequentiell erfaßt werden. Wenn nur zwei Blickwinkel für die Weiterverarbeitung benutzt werden, dann spricht man auch von Stereographie.

Die Stereographie nutzt wie das menschliche Auge mehrere Bilder, um einen Eindruck von den räumlichen Verhältnissen zu bekommen. Schon 1848 entdeckte der englische Physiker Charles Wheatstone, daß ein räumlicher Seheindruck entsteht, wenn der Mensch zwei Bilder gleichen Inhalts mit unterschiedlichem Sehwinkel betrachtet (engl. Stereo Vision).

Die Orientierung der Kameras in der Meßszene kann über speziell auf dem Meßobjekt aufgeklebte Marken geschehen. Eine solches Beispiel zeigt Abbildung 6-14, daneben sind auch Beispiele verwendeter Signalmarken abgebildet. Codierte Signalmarken werden benutzt, um die Auswertung der einzelnen aufgenommenen Meßszenen schneller durchführen zu können. Bildverarbeitende System sind in der Lage, solche Signalmarken in verschiedenen Aufnahmen wiederzuerkennen und zuzuordnen, vergleiche Kapitel 6.3.3.2.

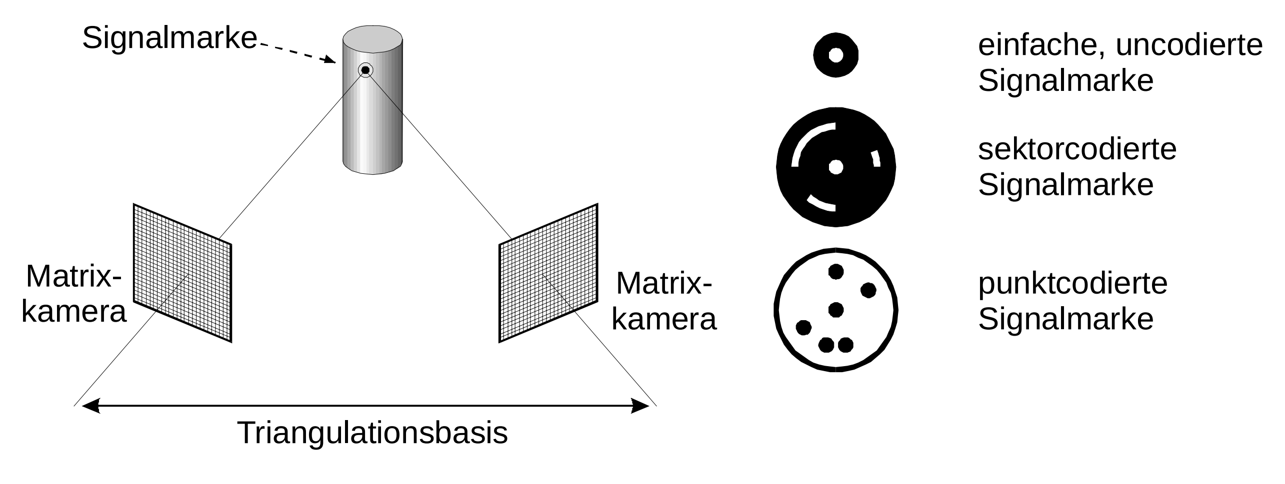


Abbildung 6-14: passive Stereographie

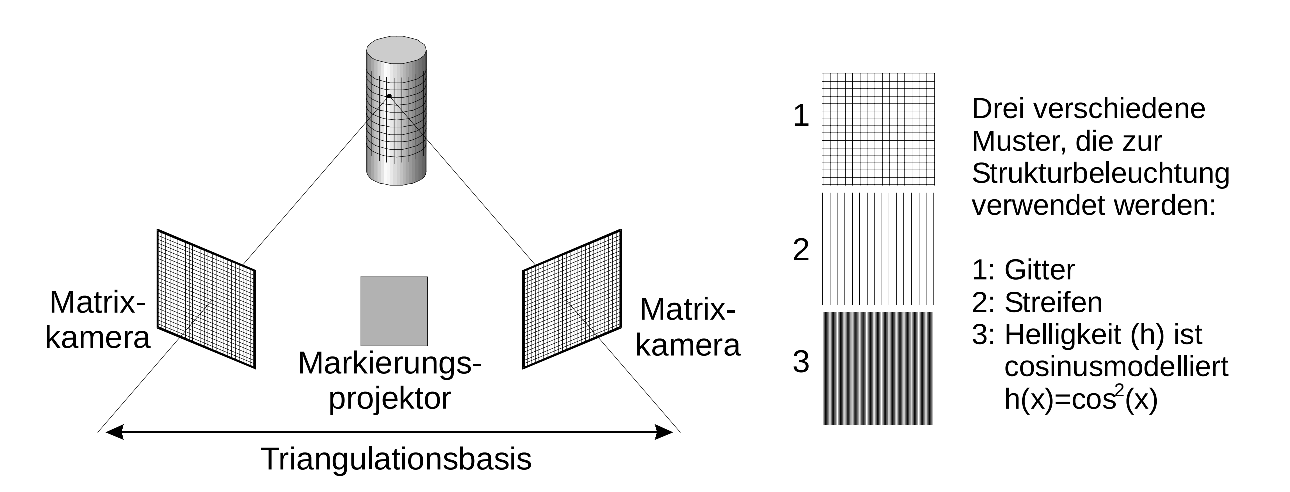


Abbildung 6-15: aktive Stereographie

Der Sensor *Optoshape* von Massen benutzt das Verfahren der aktiven Stereographie [Erh96]. Hierbei wird mit einem Projektor in der Intensität sinusförmig modulierte Streifengitter auf das Objekt projiziert und von **einer** CCD-Kamera unter einem Triangulationswinkel aufgenommen. Die Paarung Kamera/Projektor ist bei diesem Sensor in eine fünfachsige Positioniereinheit eingespannt. Durch die Positioniereinheit kommt dieser Sensor im Gegensatz zu anderen Triangulationssystemen mit nur **einer** Kamera aus. Durch Abzählen der Streifen und Abmessung der Streifendefomation kann auf den Höhenwert des Punktes geschlossen werden.

Da die Auflösung der stereographischen Verfahren direkt von den aufprojizierten Gitterlinien abhängt, ist man bestrebt, mit möglichst hoher Streifendichte zu arbeiten. Die Streifendichte und damit die laterale Punktdichte wird aber von der Auflösung des CCD-Chips der verwendeten Kamera nach oben beschränkt. Mit dem Moiré-Verfahren kann dieses Problem umgangen werden.

6.3.2.4 Moiré-Verfahren

Dieses Verfahren zum aktiven, bildgebenden Digitalisieren ist sehr verbreitet und soll aus diesem Grund kurz erläutert werden: Auf ein Objekt wird ein Liniengitter projiziert. Dieses wird ähnlich wie bei der Photogrammetrie von einer Videokamera unter einem bestimmten Winkel aufgezeichnet. Hinzu kommt die gleichzeitige oder nachträgliche Verknüpfung mit der Projektion eines

Referenzgitters. Durch das Überlagern des Projektionsstrahlbündels mit dem Beobachtungsstrahlbündel bilden sich sogenannte Moiré-Linien. Jede Linie stellt eine Isotrope (Linien gleichen Abstands vom optischen Sensor) dar, so daß die Linien die Ränder der Ebenen sind, mit denen das Objekt senkrecht zur Blickrichtung geschnitten wird. Dadurch wird ein direktes Berechnen von 3D-Koordinaten möglich [Wei95]. Dieses Verfahren (engl. Moire Method) wird vom Sensor COMET 100 eingesetzt.

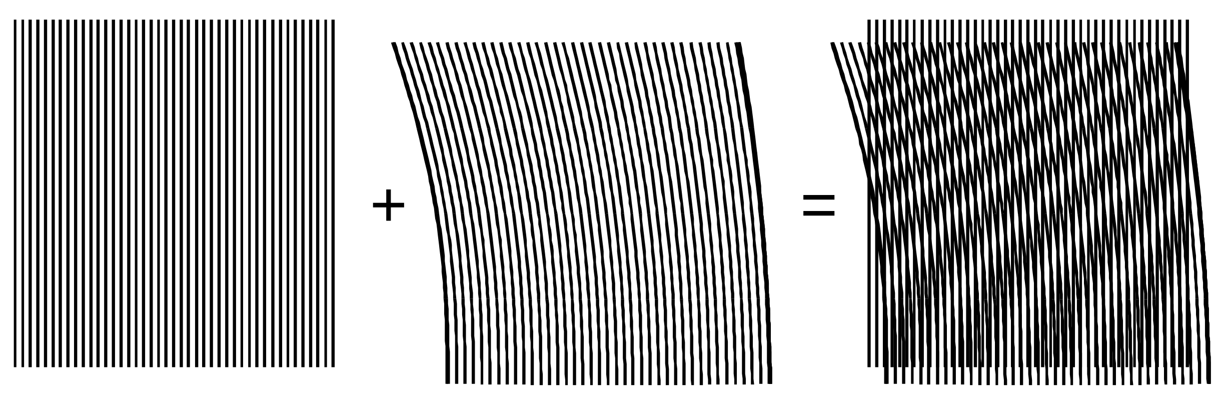


Abbildung 6-16: Überlagerung von deformierten Streifen ergeben Morié-Linien

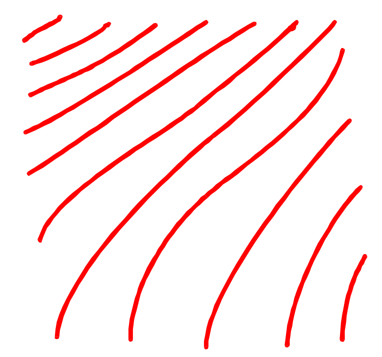


Abbildung 6-17: Morié-Linien entsprechen Höhenlinien (Isotrope)

Eine häufig angewandte Streifenauswertung ist die hierarchische Phasenshift-Methode. Für die Lösung der Gleichungen dieser Methode sind vier Phasenverschiebungen notwendig. Es müssen demzufolge vier verschiedene Aufnahmen von einem Objekt gemacht werden, wobei nur das projizierte Gitter definiert verschoben wird. Häufig werden piezoelektrische Translatoren zur exakten Verschiebung eines Gitters im Referenzstrahlengang verwendet.

6.3.3 Drei optische Sensoren

6.3.3.1 scancad laser

Die Firma *BCT* bietet KMGs zum Digitalisieren mit taktilen und optischen Meßköpfen an. Optische Meßköpfe sind mit einem Laser ausgestattet, der die Oberfläche nach dem Prinzip der rotationssymmetrischen Triangulation vermißt. Der Laser funktioniert als Abstandssensor. Das Digitalisieren geht genauso wie das taktile Digitalisieren vonstatten. Die Meßgenauigkeit hängt in erster Linie vom KMG und dessen Führungsmechanik ab. *BCT* gibt für seine 3D-Digitalisiergeräte (scan machine) eine Abweichung von 6 µm an der Meßkugel an. Die Steuerung der Digitalisiergeräte übernimmt eine eigens dafür entwickelte Software, die von der Firma *BCT* entwickelt wurde.

6.3.3.2 *Ganymed 97*

Im Rahmen des Innovationsprojekts *„reen“* (Reverse Engineering) werden vom Arbeitsbereich FT4/TM im Forschungszentrum Ulm modular aufgebaute, fabriktaugliche Systeme zur dreidimensionalen Formbestimmung und Auswertung entwickelt. Bei dieser Anwendung der Streifenprojektion wird ein Bild in 30 Sekunden erfaßt, und es werden 20.000 Punkte pro Minute aufgenommen.

Kernstück des *Ganymed 97* ist ein Streifenprojektions-Sensor mit einem Meßvolumen von 500x500x500 mm^3 und einer Meßunsicherheit von 0,1 mm. Der Sensorkopf wiegt rund 7 kg und besteht im wesentlichen aus einer *Pulnix 1010* Kamera und einem im Rahmen des Projekts entwickelten Streifen-Projektor. Die Positionierung des Sensorkopfes erfolgt mit einem fahrbaren, flexiblen Stativsystem. Die einzelnen Ansichten werden mit Hilfe von photogrammetrischen Navigationsverfahren zusammengesetzt, wodurch sich ein prinzipiell unbegrenztes Meßvolumen ergibt. Für die photogrammetrische Navigation werden die Oberflächen mit Paßmarken beklebt. Die Messung erfolgt mit mehreren Einzelansichten; es wird dabei eine sehr große Anzahl von Punkten erfaßt. [Mic97]

Systemsteuerung und Auswertung der umfangreichen Datenmenge erfolgen mit dem Softwaresystem *DigiMan*, das ebenfalls im Rahmen vom Projekt „reen“ entwickelt wurde.

6.3.3.3 *ATOS*

ATOS (Advanced Topometric Sensor) ist ein optischer Sensor der Firma *GOM* aus Braunschweig, der unter anderem im Forschungsbereich 4 (FT4/TM) in Ulm eingesetzt wird. Für die Digitalisierung von Werkzeugen hat dieses System die größte Kapazität, weil die Messung in kürzerer Zeit als beim ScanCAD Laser durchgeführt werden kann, und weil keine Paßmarken wie bei *Ganymed 97* auf die Oberfläche geklebt werden müssen. Mit dem *ATOS*-Typ wurde im FT4/TM ein Schnittwerkzeug mit Freiformanteilen digitalisiert.

ATOS arbeitet mit dem Prinzip der Streifenmusterverarbeitung. Es werden unterschiedliche Streifenmuster auf die Objektoberfläche projiziert und von zwei Kameras aus verschiedenen Winkeln aufgenommen. Mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung werden auf Basis des Triangulationsprinzips für die 439.296 Kamerapixel die entsprechenden 3D-Koordinaten errechnet.

Der Sensor wird von einer speziell entwickelten Software gesteuert, die auch die Aufgabe der Datenverarbeitung übernimmt. Die *ATOS*-Software ist, wie die gängigen CAD-, CAM- und FEM-Systeme, unter der Standardumgebung einer Workstation implementiert. Sie ist auf verschiedenen Betriebssystemen wie Windows NT, HP-UX, IRIX, AIX, Solaris zu betreiben. Die Systemfunktionen werden über die Software gesteuert. Optional steht eine programmierbare C-Bibliothek zur Verfügung, mit der die *ATOS*-Funktionen in eigene Programme eingebunden werden können.

Atos-Sensoren werden mit unterschiedlichen Meßbereichen und in unterschiedlichen Größen angeboten. Es kann eine Meßfeldbreite zwischen 10mm und 1000mm gewählt werden, wobei sich die Genauigkeit und der Meßpunktabstand zur Meßfeldbreite nahezu proportional verhalten. Im folgenden sind die Daten typischer Sensoren beispielhaft aufgeführt:

Meß-Sensoren	ATOS-Typ 1	ATOS-Typ 2	ATOS-Typ 3
Meßvolumen [mm³]	380x230x280	190x115x140	12x7x8
Meßgenauigkeit [µm]	+/-50	+/-25	+/-1,5
Meßpunktabstand [µm]	500	250	16
Aufnahmezeit [s]	10	10	10
max. Meßpunktanzahl	439.296	439.296	439.926
Abmessungen [mm³]	520x110x150	350x110x150	220x110x150
Gewicht [g]	2.500	2.300	2.200
Arbeitsabstand [mm]	500	250	30

Abbildung 6-18: Technische Daten der Atos-Sensoren

6.3.4 Zusammenfassung

Optisches Digitalisieren ist ein sehr schnelles Verfahren, denn Meßpunkte werden um Größenordnungen rascher aufgenommen als beim taktilen Digitalisieren. Die Ausnahme bildet das punktweise Laser-Triangulieren, bei dem kein nennenswerter Unterschied in der Digitalisierungsrate zu verzeichnen ist [Brem97]. Das optische Digitalisieren ist berührungslos, und dadurch können auch nachgiebige oder heiße Teile erfaßt werden. Durch die direkte Aufnahme der Oberfläche entfällt eine Kompensation des Tasterradius, was eine große Zeitersparnis bedeutet.

Viele optische Verfahren werden durch sehr glatte (glänzende) oder sehr rauhe Oberflächen gestört. Die Streuung der Meßwerte liegt weit über der Varianz von taktilen Digitalisierungsergebnissen.

Bereiche, die nicht im Sichtbereich der Aufnahme liegen, können nicht digitalisiert werden. Hierzu müssen mehrere Aufnahmen gemacht werden. Wenn die Ergebnisse aus zwei Aufnahmen zusammengelegt werden, muß ein gemeinsames Koordinatensystem (Lage und Orientierung) festgelegt werden. Die Kalibrierung der einzelnen Ansichten zueinander muß meist noch manuell durchgeführt werden und erzeugt durch die Koordinatenverschiebung einen zusätzlichen Fehler. In diesem Bereich wird zur Zeit viel Forschung und Entwicklung betrieben, um den Fehler und den Aufwand, der durch das Verschieben und Verdrehen der Koordinatensysteme entsteht, so gering wie möglich zu machen.

6.4 Be- und Verarbeiten von Digitalisierdaten

Ebenso wichtig wie das anwendungsgerechte Aufnehmen der 3D-Digitalisierungsdaten ist deren Aufbereitung.

Punktwolken sind eine Menge von Punkten, die eine Geometrie, beispielsweise eine Fläche beschreiben. Eine Punktwolke ist also eine Schar von Punkten, die im allgemeinen als Datei im ASCII-Fomat vorliegen. Es gibt kleine Unterschiede zwischen den ASCII-Formaten, die von den verschiedenen Digitalisierungsprogrammen ausgegeben werden. Ein Beispiel zweier identischer Punkte soll dies belegen:

Ausgabe von der *ReniShaw*-Software: `X1.23456789 Y2.34567890 Z3.45678901`

ASCII-Standard, der vom *Surfacer* erwartet wird: `1.23456789 2.34567890 3.45678901`

Eine Punktwolke kann bearbeitet oder verarbeitet werden. Unter dem Bearbeiten von Punktwolken wird das softwaremäßige „Anfassen" der einzelnen Punkte verstanden, wenn diese in Ihrer Lage verändert werden.

Der Unterschied zwischen dem Be- und dem Verarbeiten liegt in der Art der Ergebnisse. Beim Bearbeiten von Punktwolken kann das Ergebnis ebenfalls immer nur eine Punktmenge sein. Beim Verarbeiten muß das nicht der Fall sein, hierbei kann die Ausgabe eine NC-Steuerung, eine STL-Datei oder sogar eine CAD-Flächen-Beschreibung sein.

6.4.1 Filtern (Ausdünnen)

Jeder Art von Verarbeitung sind bestimmte Kriterien zugrundegelegt. Primäres Kriterium ist normalerweise die Datenreduktion. Hinzu können Kriterien wie minimaler Informationsverlust oder maximaler Punktabstand kommen.

Beim Filtern von Punktwolken werden die Punkte selber nicht versetzt oder auf irgendeine Weise verändert. Es werden nur ausgesuchte Punkte aus der Punktwolke gelöscht. Die verschiedenen Verfahren zur Reduktion unterscheiden sich in der Art, wie diese zu eliminierenden Punkte bestimmt werden.

Die Mathematik bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Punktreduktion an. Die einfachste ist wohl die Auswahl von Punkten in determinierten Abständen. Diese Methode wird häufig eingesetzt, da sie praktisch ohne Rechenaufwand auskommt. Doch der Nachteil dieses Verfahrens liegt gerade in der Determinierung der zu filternden Punkte, die den tatsächlichen Verlauf nicht berücksichtigt.[Wol88]

Mehrere Methoden, die in der Genauigkeit steuerbar sind, benutzen einen Toleranzzylinder, der um die zu filternden Punkte gelegt wird. Diese Reduktionsverfahren sind entweder über den Radius des Toleranzzylinders direkt steuerbar oder aber auch über eine festgelegte Datenreduktion indirekt beiflußbar. Solche Verfahren können nur für sortierte Punktwolken benutzt werden. Wollenberg geht in seinem 1988 erschienenem Buch auf viele Verfahren der Datenreduktion von sortierten Punktwolken ein. Die Verfahren in [Wol88] werden in den aktuell angebotenen Programmen eingesetzt.

6.4.2 Entrauschen/Glätten

Optische Daten weisen meist ein Rauschen auf. Hinzu kommen sogenannte Ausreißer, das sind Punkte, die fernab jeder Oberflächen liegen. Es gilt, das Rauschen zu glätten und die Ausreißer ausfindig zu machen und zu löschen.

Beim reinen Glätten einer Punktwolke werden keine Punkte weggelassen, sondern nur Punkte neu angeordnet. Eine verbreitete Glättungsmethode ist der *Gleitende Durchschnitt*. Hierbei wird immer eine bestimmte Anzahl benachbarter Punkte zu einem Punkt zusammengefaßt [Wol88].

6.4.3 Ausrichten von Flächen an Punktwolken

Das interaktive oder automatische Ausrichten von Punktwolken an CAD-Flächenbeschreibungen oder umgekehrt wird im Umfeld der Flächenrückführung kurz als *Fitten* bezeichnet. Hierbei wird

eines der beiden Objekte durch Drehen und Verschieben so gut wie möglich an das andere Objekt angenähert, dabei wird aber keines der beiden Objekte verändert.

In der Anwendung kommt es oft vor, daß eine Wolke von Meßpunkten am vorhandenen CAD-Modell ausgerichtet werden muß, um einen Soll-Ist-Vergleich (CAD ⇔ Messung) durchführen zu können, oder um die CAD-Konstruktion anhand der Punkte zu aktualisieren.

An der Aufgabenstellung des automatischen Ausrichtens von Punktwolken an CAD-Beschreibungen wird derzeit viel geforscht. Es gibt beispielsweise noch kein Programm, das eine partielle CAD-Beschreibung an einer Punktwolke ausrichten kann, so daß die Übergänge möglichst eben sind.

6.4.4 DigiMan

Am Beispiel *DigiMan* soll eine Software vorgestellt werden, deren Schwerpunkt im Be- und Verarbeiten von Punktwolken liegt:

Anforderungen an eine Software zum Steuern von optischen Meßsystemen und der Punkteverarbeitung sind hoch. Der Bereich Forschung und Technik 4 (FT4) der Daimler-Benz AG entwickelt in Ulm ein Programm, das leistungsfähig und einfach zu bedienen sein soll. *DigiMan* (Digitalisier-Manager) ist ein Softwarepaket, das der Erfassung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Meßdaten dient. Es ermöglicht dem Anwender die typischen Tätigkeiten, beginnend bei der Digitalisierung über die Auswertung bis hin zur CAD-gerechten Datenaufbereitung, in einer homogenen, grafischen Softwareumgebung durchzuführen. *DigiMan* wird für verschiedene grafische Betriebssysteme entwickelt, wie *z. B.* IRIX, HP-UX oder Windows NT. [Mal97a]

Die grafische Benutzeroberfläche erlaubt eine Visualisierung der Meßdaten und interaktive Techniken zur Datenauswertung und Weiterverarbeitung. Spezielle Verfahren ermöglichen die Verarbeitung besonders umfangreicher Datenmengen. Es stehen Schnittstellen zu externen Softwaresystemen zur Verfügung.

DigiMan kann 3D-Daten visualisieren, drehen und verarbeiten. Eine effiziente Datenhaltung von 100 Millionen Punkten ist möglich.[Mal97a]

Neben der Steuerung von externen Softwarepaketen wurden in diesem Programmpaket auch viele Bearbeitungs- und Auswertungsfunktionen implementiert, die nicht nur bei der Verarbeitung von 3D-Daten benötigt werden:

- Erfassen, Strukturieren und Visualisieren großer Datenmengen
- Konvertieren in verschiedene Datenformate
- Ausdünnen der Meßdaten

Die Software *DigiMan* bietet fünf verschiedene Algorithmen zur Reduktion des Umfanges einer Punkteschar an. Die Reduktion von Punktwolken ist in den meisten Fällen mit einem Verlust an Information verbunden.

Beurteilung:

DigiMan bietet eine große Auswahl an Filterfunktionen, die aber zum größten Teil auf die Verarbeitung von optischen Daten ausgelegt sind. Da zur Zeit in den Vorbetrieben des Werks 010 nur taktile Daten verarbeitet werden, bringen diese Filter wenig Vorteile.

Optische Daten bestehen oft aus vielen einzelnen Aufnahmen, die in ein globales Koordinatensystem gebracht werden müssen. Dieses Problem entfällt bei taktil gemessenen Punktdaten meist, weil die meisten Objekte in einer Aufspannung digitalisiert werden können; vergleiche hierzu Kapitel 6.2.

6.5 Fazit

Beim Digitalisieren mit optischen Mitteln gibt es Fehlereinflüsse, die wegen ihrer Situationsabhängigkeit prinzipiell nicht oder nur unzureichend mit Kalibrierverfahren erfaßt und kompensiert werden können [KrMa97]. Das punktweise optische Digitalisieren bietet gegenüber den taktilen Verfahren keine ausschlaggebenden Vorteile. Digitalisieren in Streifen kann den Anforderungen, die von den zu verarbeitenden Geometrien (Werkzeuge) gestellt werden, nicht gerecht werden. Es ist mehr für Designmodelle geeignet [Brem97]. Die meisten optischen Digitalisierverfahren, die ihre Daten flächig aufnehmen, besitzen noch experimentellen Charakter und sind wegen des hohen Aufwandes nicht direkt in der Produktion einsetzbar. Hinzu kommt die Tatsache, daß die zu digitalisierenden Werkzeuge in den Bereichen der Instandhaltung zu viele verschiedene Größenverhältnisse besitzen, um ein optimales optischen Digitalisierverfahren empfehlen zu können.

Es gibt optische *„Tastköpfe“*, die aber den aufwendigen und teuren Aufbau und Unterhalt eines Koordinatenmeßgerätes voraussetzen. Ungenauigkeiten im KMG fließen somit in das jeweilige Meßergebnis ein. Streuungen solcher Systeme liegen meist im Bereich der Rauheit der gemessenen Objekte. [Kim87]

Unter anderem hat sich bei der Analyse der Genauigkeitsanforderungen bei Werkzeugen herausgestellt, daß gerade bei Schnittkanten von Preßwerkzeugen die Genauigkeiten von optischen Systemen nicht ausreichend sind. Hier können prismatische Schnittkanten einfach und schnell taktil erfaßt und in Kurven rückgeführt werden. Infrage kommen sowohl Schnittkanten, die gekrümmt im Raum verlaufen, als auch Schnittkanten von einzelnen 2D-Schnittkonturen. Problematisch sind nur Werkzeuge zum Feinschneiden, weil hierbei die Genauigkeitsanforderungen viel höher liegen. Diese müssen bei der Herstellung (Drahterodieren) solcher Werkzeuge dem NC-Programmierer als Geometriebeschreibung vorliegen.

Die zu digitalisierenden Objekte im Bereich der Instandhaltung in den Vorbetrieben des Aggregatebereiches sind gegen die kleinen Kräfte eines taktilen Tasters unempfindlich. Hieraus kann also keine Anforderung für die Verwendung von berührungslosen Verfahren abgeleitet werden.

Mit dem System „*Cyclone*“ von *ReniShaw* wurden in der Verfahrensentwicklung für Mechanik (VEM) bisher gute Erfahrungen gemacht. Die Maschine und die Steuerungssoftware ist sicher zu bedienen und liefert schnell gute Ergebnisse. Die Firma *IntiTEC* verwendet dieses System zur Digitalisierung von Design- und Werkzeuggeometrien, um diese Daten in Auftragsarbeit mit der eigenen Software „*IntiSurf*“ rückzuführen. Dies belegt, daß die Genauigkeit dieses taktilen Digitalisiergerätes für die Praxis ausreicht.

Für die Belange des laufenden Projektes *zur „Einführung von Reverse Engineering in die Instandhaltung“* sollte die Funktion der Punkteverwaltung und Punkteverarbeitung im Programm der Flächenrückführung integriert sein, so wie es bei einigen Programmen schon im Ansatz der Fall ist. Eine zusätzliche Software zwischen Digitalisieren und der Punktverarbeitung sollte vermieden werden.

7 Abtastdatenverarbeitung

7.1 Begriffsdefinition

Unter „Abtastdatenverarbeitung“ versteht man alle Arten der Fräsbahngenerierung aus Punktwolken, ohne dabei eine CAD-Flächenbeschreibung zu erzeugen. Die Abtastdatenverarbeitung wird oft auch als elektronisches Kopierfräsen bezeichnet.

Der Begriff „Datenrückführung“ hingegen bezeichnet im Rahmen dieser Arbeit jede infrage kommende Verarbeitung von Digitalisierungsdaten. Dies schließt die Abtastdatenverarbeitung, das elektronische Kopierfräsen und die Flächenrückführung ein.

7.2 Übersicht über die Möglichkeiten der Datenrückführung

Abbildung 7-1 zeigt in einer Übersicht die möglichen Wege der Daten vom Originalteil bis hin zum Produkt der Datenrückführung. Es gibt grundsätzlich vier verschiedene Möglichkeiten, Digitalisierdaten weiter zu bearbeiten, diese schließen sich gegenseitig aber nicht aus.

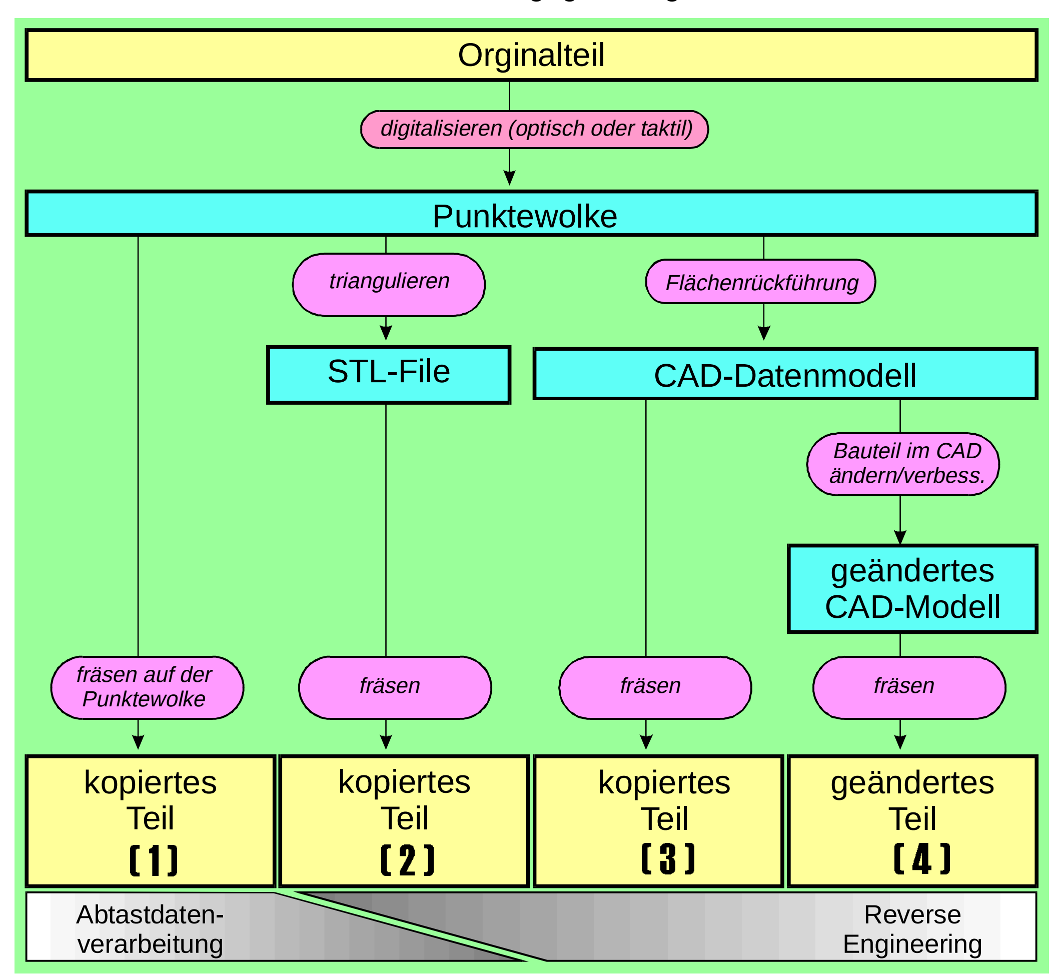


Abbildung 7-1: Abtastdatenverarbeitung und Reverse Engineering

Abtastdatenverarbeitung ist nur mit geordneten Punktwolken möglich. Solche Daten entstehen beim taktilen Digitalisieren, aber auch bei einigen optischen Verfahren, die die Oberfläche Punkt für Punkt erfassen (punktweise), vergleiche Kapitel 6.3.1.

7.3 Elektronisches Kopierfräsen

7.3.1 Erläuterung

Die direkte Abtastdatenverarbeitung ist die einfachste Methode, die Tastermittelpunkte direkt in NC-Daten umzusetzen. Dieses als elektronisches Kopierfräsen bekannte Verfahren ist weit verbreitet [EnFr96]. Voraussetzung ist, daß das Fräswerkzeug in seiner geometrischen Gestalt mit dem Taster identisch ist. Die 3D-Koordinaten der zu fräsenden Oberfläche werden direkt in NC-Steuercodes umgesetzt. Die Fräsmaschine verfährt entlang der Verbindungslinien zwischen den einzelnen aufgenommen Punkten.

Dieses Verfahren kann sinnvoll eingesetzt werden, um aus einem in Ton geformten Modell ein Klopfmodell als Ureol zu fräsen. Solche Klopfmodelle dienen als Grundkörper zur manuellen Blechbearbeitung im Prototypenbau. Der Kunststoff Ureol ist hierfür besonders geeignet, weil er mit sehr großen Vorschüben schnell fräsbar ist und beim Klopfen von Blech nicht zur Rißbildung, das heißt zum Splittern, neigt.

7.3.2 Kritik

Problematisch ist, daß die Frässtrategie starr mit der Digitalisierstrategie gekoppelt ist. Da in der Regel zeilenförmig abgetastet wird, ergeben sich auch zeilenförmige Fräsbahnen, die unter technologischen Aspekten nicht optimal sind. Daneben bereitet auch die Schruppbearbeitung, also das Entfernen größerer Materialvolumina, Probleme. Die am Markt verfügbaren Systeme, die direkt auf Digitalisierdaten rechnen, erzeugen hier unter Aspekten der Wirtschaftlichkeit sehr ungünstige Fräsbahnen, die einen extrem hohen Anteil von Abhebe- und Überlaufbewegungen enthalten.

Die Fräsergeometrie muß identisch mit der Tastergeometrie sein. Daraus folgt, daß das Objekt mit mehreren Tastern digitalisiert werden muß, wenn beim Fräsen verschiedene Werkzeuggeometrien benutzt werden sollen. [Fri96].

7.4 Polyederflächen

Die einfachste Flächenbeschreibung, die aus Punktdaten abgeleitet werden kann, ist eine Polyederfläche. Bei der Polyederfläche sind die jeweils benachbarte Punkte verbunden und beschreiben somit die dazwischenliegende Dreiecksfläche.

7.4.1 Das STL-Format

STL-Dateien bewegen sich im allgemeinen in der Größenordnung mehrerer Hundert Megabyte. Dies liegt an der extrem speicherintensiven Beschreibungsart. Es gibt zwei verschiedene STL-Formate, ein ASCII-Format und ein binäres Format. Das ASCII-STL-Format beschreibt im Klartext die Lage der Dreiecksflächen. Jedes Dreieck wird durch einen bestimmten länglichen Syntax beschrieben, indem die Eckpunkte auf sieben Nachkommastellen genau definiert werden. Zusätzlich wird ein Normalenvektor zu jeder Fläche angegeben. Da alle Dreiecke direkt aneinander grenzen, wird jeder Eckpunkt drei- bis sechsmal beschrieben. Das STL-Format weist demnach eine stark Datenredundanz auf.

Ein Versuch mit einer Polyederfläche aus 9.000 Eckpunkten ergab ein STL-File von 300 Kilobyte. Das weniger verbreitete binäre STL-Format belegte immer noch 120 Kilobyte des Speichers. Eine Kompression der ASCII-STL-Datei erbrachte eine Kompressionsrate von Faktor 15. Das heißt,

die komprimierte Datei belegte nur noch 20 Kilobyte. Diese hohe Kompressionsrate beweist die starke Redundanz im STL-File.

7.4.2 Polyederflächen erstellen

Durch Facettierung entsteht aus einer Punktwolke ein Polyederflächen-Verband. Dieser Vorgang kann von den verschiedenen Programmen mehr oder weniger automatisch durchgeführt werden. Beim normalen Ablauf einer Triangulierung werden sehr kleine Dreiecke in den Zwischenräumen von jeweils drei benachbarten Punkten gebildet. Bei Daten, die durch bildgebende Digitalisierverfahren erfaßt wurden, gestaltet sich dies softwaretechnisch etwas aufwendiger, da die Punkte ungeordnet im Raum liegen und besondere Algorithmen verwendet werden müssen, um möglichst schnell die benachbarten Punkte im Datensatz zu lokalisieren. Taktil aufgenommene Daten dagegen sind meist sehr gleichmäßig und zeilenweise geordnet.

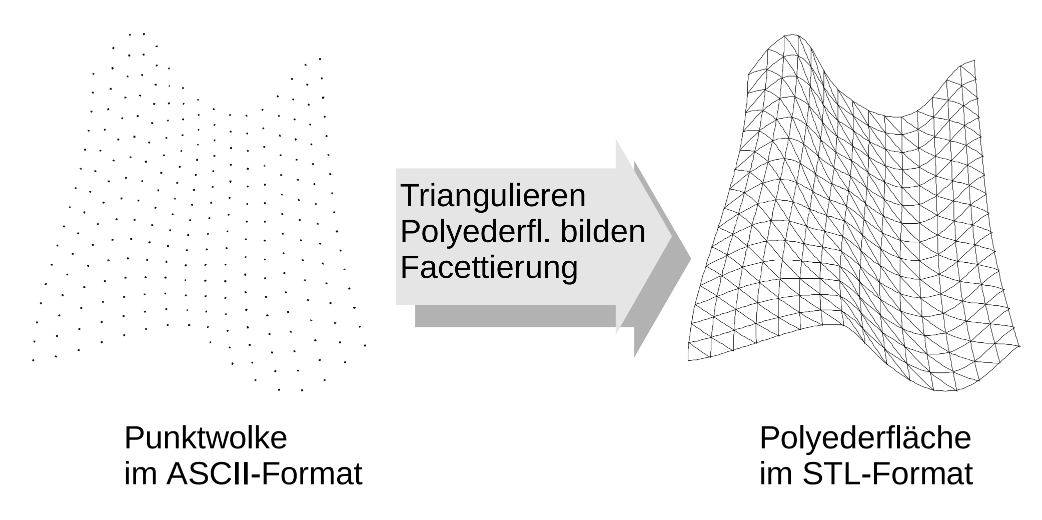


Abbildung 7-2: Triangulieren von Punktwolken

Punktwolken sind zum Triangulieren (Facettieren) besser geeignet, wenn sie eine geringe Streuung aufweisen, und wenn die digitalisierte Fläche in z-Richtung projizierbar ist. Projizierbare Datensätze sind Datensätze ohne Hinterschneidungen und ohne in z-Richtung abfallende Flächen. Solche Flächen sind bei Umformwerkzeugen (Pressen und Schmieden) üblich.

7.4.3 Beispiel

Das Programm *Surfacer* (genaueres im Kapitel 9.7) ist in der Grundinstallation in der Lage, automatisch Polyederflächen zu erstellen. Ein interaktiver Eingriff ist dabei nicht vorgesehen. Beim automatischen Vernetzen von Punkten treten aber häufig Probleme wegen zweideutiger Punkte in der Punktwolke auf. Diese Problematik ist nicht auf den *Surfacer* beschränkt. Diese uneindeutigen Punkte in den Punktwolken führen zu einer Art Laufmaschen in der Vernetzung, die sich bis an den Rand der Punktwolke fortsetzen. Dieses Problem kann in der Grundinstallation von *Surfacer* nur relativ aufwendig und manuell gelöst werden.

Mit dem Rapid-Prototyping-Modul (RP-Modul) für den *Surfacer* von ImageWare kann hier schnell und einfach interaktiv eingegriffen werden. Dieses Spezialmodul ist im normalen Lieferumfang des Programms nicht enthalten und muß für jede Installation von *Surfacer* gesondert beschafft werden. Die Anschaffung dieses Moduls der besseren Erzeugung von STL-Daten wegen, lohnt sich nicht, da die vielfältigen Möglichkeiten der Software im RP-Bereich ungenutzt blieben.

Die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Software wird letztlich über die Einsatzmöglichkeiten des Digitalisierens bei der Fertigung von Modell, Formen und Werkzeugen definiert.

7.4.4 Lösungsansätze

STL-Daten als Grundlage zum Fräsen zu benutzen ist sehr aufwendig. Verschiedene Firmen, die Software zur Abtastdatenverarbeitung entwickeln, erstellen innerhalb der Programme eine eigene Beschreibung der Polyederfläche. Diese internen Formate sind binär und direkter anzusprechen. Der Zugriff auf die Flächenbeschreibung, die von den Punkten abgeleitet wurde, ist dadurch schneller. Die Flächenbeschreibung benötigt weniger Arbeitsspeicher.

Programme mit einem eigenen internen Format für die Polyederflächen sind beispielsweise *HyperDigit* von der Firma *Openmind , TraceCut* von *ReniShaw* und *Tebis* von der *Tebis AG*

7.5 Fazit

Das elektronische Kopierfräsen ist durchaus geeignet, schnell einen Prototypen eines digitalisierten Objekts in Kunststoff, *z. B.* in Ureol, zu fräsen; aber zum in Stahl Fräsen ist es wegen der technologiebezogenen Probleme beim Schruppen eher ungeeignet.

Die Polyederbildung aus Punktwolken kann mit einer geeigneten Software beherrschbar sein und relativ zügig durchgeführt werden. Voraussetzung ist immer, daß anhand geeigneter und einstellbarer Parameter das automatische Vernetzen indirekt kontrolliert werden kann, und daß durch direkten Eingriff in den Vorgang eventuell aufgetretene Zweideutigkeiten in der Punktwolke interaktiv bestimmt werden können.

Mittels einer Polyederbildung der digitalisierten Punkte kann man relativ zügig zu einer gefrästen Kopie des digitalisierten Objekts gelangen. Die Fräsprogramme können auf der Basis verschiedener, frei definierbarer Strategien erstellt werden und für jede beliebige Fräswerkzeug-Geometrie ausgelegt werden. Dagegen ist man bei der reinen Abtastdatenverarbeitung von der benutzten Digitalisierstrategie und der verwenden Form des Tastkörpers abhängig.

Wegen der vielen Flächen einer Polyederdatei im STL-Format entstehen aber andererseits sehr große Dateien, die je nach Punktdichte mehrere Hundert Megabyte (~ $2\text{-}6 \cdot 10^8$ Byte) groß sein können. Somit übersteigen sie die ursprüngliche Punktwolke im Datenumfang um zwei bis drei Größenordnungen. Abhilfe verschafft hier nur eine gröbere Vernetzung, was gleichbedeutend mit einem Verlust an Information und Genauigkeit ist.

<u>Zusammengefaßt:</u> Die erstellten STL-Dateien eigenen sich sehr gut als Datenbasis zum schnellen Generieren von NC-Fräsprogrammen, sind aber für eine Weiterbearbeitung im CAD genauso ungeeignet wie die Punktwolken.

Somit kann das Triangulieren eine Hilfsflächengenerierung (beispielsweise zum Fräsen) sein, aber keine Flächenrückführung. Durch die Generierung von Polyederflächen wird eine Entkoppelung zwischen Digitalisierstrategie und Frässtrategie erzielt. Die Flächenrekonstruktion durch eine Triangulierung, die sich an der Struktur der Daten orientiert, ist ein effizientes Verfahren zur Erzeugung einer Polyederfläche [Fri96]. Diese Polyederfläche kann in marktgängige CAM-Systeme überführt werden, wodurch die Leistungsfähigkeit der mittlerweile weit ausgereiften CAM-Systeme ausgenutzt werden kann. Die Entwicklung spezieller, auf Digitalisierdaten abgestimmter CAM-Systeme ist somit nicht unbedingt notwendig.

Im Hinblick auf die Anwendung in den Bereichen der Instandhaltung bei Daimler-Benz muß eine beherrschbare und schnelle Vorgehensweise zum Erstellen solcher STL-Dateien aus vorher ausgedünnten Punktwolken im Rahmen des Projektes noch getestet werden.

8 Flächenrückführung

8.1 Allgemein

Der Begriff „Flächenrückführung“ (englisch: *surface reconstruction*) hat im Zusammenhang mit dem zunehmenden Einsatz leistungsfähiger Digitalisierungssysteme Einzug in die Begriffswelt der CAD-Technologie gehalten. Die Flächenrückführung ist ein Unterprozeß der neuen Technologie des Reverse Engineerings.

8.2 Parameter der Flächenrückführung

Die Flächenrückführung einer gegebenen Punktwolke läßt sich mit relativ wenig Parametern beschreiben. Diese Parameter beeinflussen den notwendigen Einsatz von Personal, Hard- und Software.

8.2.1 Größe der Punktwolke

Derzeit liegen die Höchstgrenzen der Punktwolken, die von den Herstellern angegeben macht, zwischen ~200.000 und 5.000.000 Punkten. Die Größenordnung der Spannweite macht die Leistungsunterschiede in der Punkteverwaltung der angebotenen Programme deutlich. Bei einigen Programmen hängt (laut Herstellerangaben) die verarbeitbare Punktanzahl in erster Linie vom Arbeitsspeicher des Rechners ab, dazu zählen *Surfacer* und *ScanCAD GEO*.

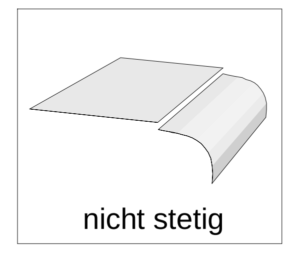
Alle getesteten Programme stellen Tools zum Filtern der Punktwolken in unterschiedlicher Vielfalt zur Verfügung. Das Ausdünnen von Punkten hat das Ziel, die zu verarbeitende Datenmenge zu minimieren, ohne einen signifikanten Verlust an Information zu verursachen. Die Mathematik stellt hierzu verschiedene, meist numerische Algorithmen zur Verfügung, die in den Programmen zur Flächenrückführung zum Einsatz kommen. Die Software *DigiMan* bietet eine sehr große Auswahl an Methoden zur Datenreduktionen, die aber meist auf optische Daten spezialisiert sind.

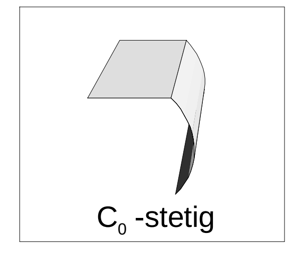
8.2.2 Stetigkeit von Flächenübergängen

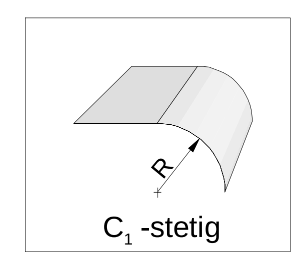
Übergänge zwischen zwei oder mehreren benachbarten Flächen können mit Hilfe von solchen Programmen zur Flächenrückführung nachträglich bearbeitet werden. Bei dieser Veränderung der Flächenauslaufbereiche zueinander verschlechtert sich – wie schon im Kapitel 8.2.1 erwähnt wurde - die Genauigkeit der Flächen.

Die Mathematik bietet für die verschieden Arten von Übergängen zwischen Flächen Definitionsmöglichkeiten an. Diese werden im folgenden noch einmal kurz erläutert:

Der Grad der Stetigkeit zwischen den Flächen wird mit folgenden Angaben beschrieben: C_0, C_1, C_2, C_3, (sprich: C-Null). Der C-Grad gibt damit die Anzahl der zulässigen Differenzierungen an. Abbildung 8-1 zeigt hierzu vier Beispiele. Die erste Grafik stellt eine Lücke oder einen Sprung zwischen den Flächen dar. Es liegt keine beschreibbare Form der Stetigkeit vor. Man spricht in der CAD-Welt von einer *Klaffung*.







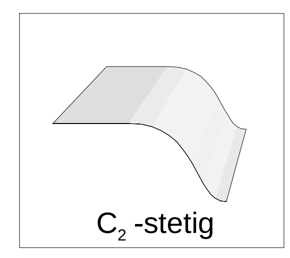


Abbildung 8-1: Klassifizierung von Flächenübergängen

Ein C_0-stetiger Übergang zwischen zwei benachbarten Flächen ist ein Bereich ohne Stufen oder Sprünge am Übergang der Flächen. Knicke sind dadurch nicht ausgeschlossen. Die zwei Flächen besitzen an ihrem jeweiligen Rand ein- und dieselbe Berandungskurve (Flächenrand auf Flächenrand).

Ein C_1-stetiger Übergang ist ein tangentialer Übergang zwischen zwei Flächen. Es treten keine Knicke mehr auf. Änderungen in der Krümmung können sprunghaft sein. Eine solche Flächengrenze könnte der Übergang von einer Ebene in einen Radius sein, wie er in Abbildung 8-1 gezeigt wird und in der Konstruktion sehr häufig anzutreffen ist.

Ein C_2-stetiger Übergang ist krümmungsstetig. Klotoide [Kra89], Evolventen und Splines sind mathematische beziehungsweise geometrische Beispiele für solche Kurven.

Bei der Flächenrückführung sollte immer eine C_1-Stetigkeit (Tangentialität) angestrebt werden. Die höchsten Anforderungen an den Verlauf der Krümmung der Fläche haben „Class A“-Flächen. Bei der Karosserieaußenhaut werden diese hohen Anforderungen gestellt. Die Lichtleitlinien , so nennt man die Spiegelungen von linienförmigen Lichtquellen, werden in speziellen Testräumen aufgenommen und ausgewertet. Solche Flächen können nur mit speziellen Tools erstellt und bearbeitet werden, wie *z. B.* ICEM Surf sie bietet.

Die aufgezählten Stetigkeitsdefinitionen zwischen zwei Flächen sind rein mathematischer Natur und sind nur in der symbolischen Beschreibung einer Fläche erreichbar. Es treten aber aufgrund der numerischen Beschreibung kleine Lücken und Unstetigkeiten zwischen den Flächen auf. Hier gibt die Norm [VDA4955] eine Lösung an: Sie schreibt anwendbare Kriterien der Datenqualität vor, die gleichzeitig mit Toleranzen versehen sind, das heißt: Die Flächen müssen nicht genau tangential sein, um die Anforderung C_1-stetig zu erfüllen.

8.2.3 Zulässige Flächentoleranz

Eine Formtoleranz ist eine geometrische Toleranz. Sie bezeichnet den Höchstwert für die Weite des zugelassenen Bereiches für eine Formabweichung. Formabweichungen sind Abweichungen eines Formelementes von seiner geometrisch idealen oder vorbestimmten Form. Die Formtoleranz bestimmt die Toleranzzone, innerhalb der das geometrische Objekt liegen muß und beliebige Form haben darf [Klei89]. Die Formtoleranz umfaßt die Geradheit, Glattheit, Rundheit (Kreisform), Zylinderform, und das Profil einer beliebigen Linie beziehungsweise Fläche. DIN ISO 1101 enthält Begriffe, Symbole und Eintragungsarten für Form- und Lagetoleranzen an einzelnen Bauteilen, die sinngemäß auch für Baugruppen (Zusammenbauten) gelten.

Wenn nun die Abweichung eines Meßpunktes zu einer Fläche bestimmt werden soll, kann man sich an den Festlegungen in DIN ISO 1101 E orientieren und analog neu definieren:

Die Abweichung eines Punktes zu einer Fläche ist definiert durch den kürzesten Betrag einer Normalenstrecke auf der Fläche. Die Normalenstrecke (auch: *das Lot*) schneidet am Startpunkt die Fläche und am Endpunkt den gemessenen Punkt.

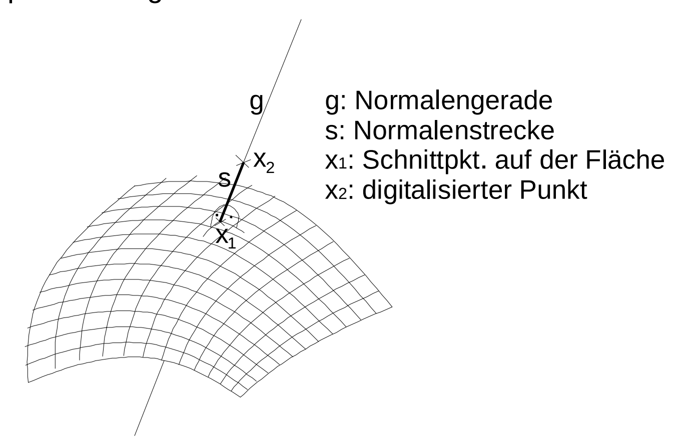


Abbildung 8-2: Abweichung eines Punktes (x_2) von einer Fläche

Die exakte Definition der Flächenformtoleranz einer beliebigen Fläche findet sich in [Fis87]. Wie solche Flächen geprüft werden, kann in [Abe83] nachgelesen werden. Die Angaben beziehen sich auf ISO 1660, Beiblatt zu DIN 7184 Teil 1, ÖNORM ISO 1660 und VSM 10 205.

Je nach Anwendung der Flächenrückführung liegt der Schwerpunkt auf der maßgetreuen Erstellung der Flächen oder deren Stetigkeit. Dies sind zwei Ziele, die niemals zugleich verwirklicht werden können. Je größer der Anspruch auf Flächenqualität ist, desto geringer müssen die Anforderungen an die Genauigkeit sein. Jedes Ausrichten von Flächen zueinander zugunsten eines stetigeren Überganges bedeutet einen Verlust an Genauigkeit.

Die unvereinbaren Ziele lauten also:

1. Man möchte die gemessenen Punkte so genau wie möglich zu Flächen rückführen. Das heißt, es sind viele Flächen notwendig, um dieses Kriterium zu erfüllen. Im Extremfall bedeutet das, zwischen den Punkten Polyederflächen aufzuspannen. Wenn viele Flächen entstehen, dann bedeutet das aber auch, daß viel Speicherplatz benötigt wird, und daß viele Übergänge (Seams) zwischen Flächen bearbeitet werden müssen. Meist kann dann nicht mehr überall eine C1-Stetigkeit (vergleiche Kapitel 8.2.2) verwirklicht werden.
2. Andererseits kann das Ziel einer Flächenrückführung aber auch sein, möglichst wenig Flächen zu erstellen. Relativ große Flächen können dann auch leichter stetig aneinander angeschlossen werden. Die wenigen Übergänge und Klaffungen zwischen den erstellten Flächen sind von der Software dann auch C2-stetig ausrichtbar. Die Genauigkeit sinkt bei dieser Priorität um mehrere Zehntel.

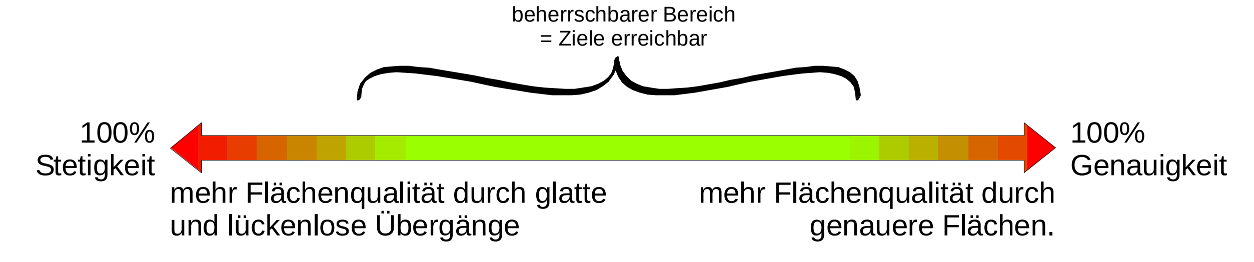


Abbildung 8-3: Flächenqualitäten bei der Flächenrückführung

kurzes Fazit:

Dieser Zielkonflikt kann gelöst werden, indem vor der Flächenrückführung eine klare Vorgabe über die gewünschte Genauigkeit und Flächenqualität gegeben wird. Bei dem Versuch, beide Ziele zu gleichen Teilen zu verwirklichen, steigt die benötigte Zeit zur Flächenrückführung steil an.

8.2.4 Größe der verwendeten Polynome zur Kurven- und Flächenbeschreibung

Die meisten Programme haben als Flächendefinition nur kubische B-Splines, also B-Splines dritten Grades. Daraus folgt, daß die Größe eines rückzuführenden Flächenbereiches in der Ausdehnung und Topologievielfalt nach oben begrenzt ist, vermeidet aber andererseits auch unerwünschte Schwingungen auf der Fläche bei Übergängen von Ebenen in Freiformflächen.

Die Programme von *BCT* und IntiTEC verwenden ausschließlich die obengenannten, niedrigen Polynomgrade (=3). Dagegen kann *Surfacer* auch NURBS und außerdem auch B-Splines bis zum 20. Grad erzeugen. Das CGO-Modul in *CATIA* kann Flächen aus B-Splines bis zum 15. Grad erstellen. Auf solchen Flächen treten jedoch naturgemäß viele Schwingungen auf. Flächen mit einem solch hohen Grad sind zur Rückführung von Freiformflächen ungeeignet. Mit diesen Polynomgraden könnte am ehesten analytisch ein Sägezahn oder eine Rechtecksschwingung auf der Fläche erzeugt werden. Solche ungeraden, periodischen Funktionen (Fourier) können mit endlichen Reihen eines hohen Polynomgrades genähert werden [Czi96].

Mit der VDA-FS-Norm kann theoretisch jede Fläche und Kurve beschrieben werden, die auf Splines beruht, unabhängig von Ihrem Grad. Die Ordnung einer 3D-Fläche (Surface) kann frei definiert werden. Praktikabel für die Flächenbeschreibung sind aber höchstens Flächen vierten Gerades.

8.2.5 Anzahl der Patches

Im allgemeinen gilt: Je weniger einzelne Flächen vorhanden sind, desto glatter wird später die Gesamtfläche. Normalerweise wird jede Regelgeometrie (soweit vorhanden) mit einem Patch beschrieben. Aber in manchen Fällen werden aufgrund unzureichender Genauigkeit die Flächen noch unterteilt. Die Erfahrung bei der Analyse der verschiedenen Programme zur Flächenrückführung hat gezeigt, daß beispielsweise sogenannte Kofferecken sehr problematisch sind, und in mehrere Patches aufgeteilt werden müssen, um die geforderte Genauigkeit erfüllen zu können. Unter Kofferecken versteht man Bereiche, in denen drei abgerundete Kanten (xyz) an einer Ecke aufeinander stoßen. Als Alternative können Kofferecken auch mit der Oberfläche der Regelgeometrie einer Viertelkugel angenähert werden.

8.3 Konstruktion an den Punkten (Engineering)

Eine ganz andere Art von Flächenrückführung ist das Engineering. Bei diesem Verfahren werden keine Freiformflächen, sondern nur Regelgeometrieflächen erstellt.

Das Konstruieren von Regelgeometrien auf der Basis digitalisierter Flächen ist die schnellste Form des Flächenrückführens. Die digitalisierten Geometrien werden in einer speziellen Software halbmanuell ausgewertet, und die Fläche wird auf den Grundelementen (Vierecksfläche, Kegelmantelfläche, Kreisfläche, Kugelfläche usw.) aufgebaut.

Eine Software für diese Vorgehensweise muß Punkte und Flächen verarbeiten können. Punkte müssen eingeladen, angezeigt, selektiert und analysiert werden können. Die Analysefunktion sollte beispielsweise aus einer Anzahl von selektierten Punkten den Radius des Kreisbogens ableiten können. Eine statistische Auswertung ist von Vorteil, da die Information über einen Radius aus vielen Punkten genauer ist als der Radius, der nur aus drei Punkten geometrisch berechnet wird.

Dieses Verfahren kann nur bei einem großen Anteil an konstruktiv erstellten Geometrien greifen. Wenn die Orginalgeometrie große Freiformflächen enthält, müssen diese beim Flächenerstellen unterteilt und mit Regelgeometrieflächen umschrieben werden. Dabei kann keine sehr gute Genauigkeit mehr erreicht werden.

Der Nachteil des Verfahrens ist die Tatsache, daß die kleinen, manuellen Änderungen am Werkzeug aufgrund ihrer Unregelmäßigkeit meist nicht erfaßt werden. Diese funktionsorientierten Änderungen (*z. B.* eine lokale Änderung eines Radius) sind aber oft die Änderungen, die den Unterschied zwischen dem CAD-Modell und dem physischen Modell des Werkzeugs ausmachen. Deswegen ist dieses Verfahren nur für die Rückführung von Konstruktionen empfehlenswert, die größtenteils aus Regelgeometrien bestehen und zu denen kein CAD-Modell existiert.

8.4 Fazit

Die Flächenrückführung ist vielseitig einsetzbar und bietet Vorteile sowohl für die Konstruktion von Betriebsmitteln als auch für die Entwicklung neuer Produkte. Viele Parameter beeinflussen den Arbeitsaufwand, den eine Flächenrückführung mit sich bringt. Bevor ein Bauteil rückgeführt wird, muß eine klare und möglichst eindeutige Arbeitsanweisung erfolgen, die detaillierte Anforderungen an Genauigkeit und Stetigkeit der rückzuführenden Flächen einschließt. Es muß festgelegt werden, in welchen Bereichen des Teils welche Genauigkeits- und Stetigkeitsanforderungen gelten und wo eventuell mit Regelgeometrien gearbeitet werden kann. Jede Vereinfachung und Konkretisierung hilft dem Konstrukteur, bei der Flächenrückführung seine Arbeit effizienter zu gestalten. Anhaltspunkte über die Anforderungen und Toleranzen der Bauteile können dem Prüfplan eines Rohteils entnommen werden.

Eine Arbeitsanweisung „...so genau wie möglich...“ bewirkt nur, daß sich die benötigte Zeit vervielfacht.

9 Software zur Flächenrückführung

Innerhalb des Projektes bei Daimler-Benz wurden unter anderem die folgenden vier Programme zur Flächenrückführung getestet. Die Diplomarbeit wird auf diese Programme genauer eingehen.

1. *scancad geo* von Firma *BTC*, Dortmund
2. *IntiSurf* von Firma *IntiTEC*, Aachen
3. *Surfacer* von Firma *Imageware*, USA
4. *Cloud to Geometry* (CGO), *CATIA*-Modul (R4 V1.8 und höher), von *Dassault Systems*, Paris

Bis auf CGO, funktionieren die gestesteten Programme als „Stand-alone".

9.1 *scancad geo* von Firma *BTC*

Die Firma *BCT* GmbH wurde 1986 gegründet und hat ihren Sitz in Dortmund. Zur aktuellen Produktpalette gehören Produkte aus dem Softwarebereich und der Digitalisierungstechnik . Alle angebotenen Lösungen gehören zum Umfeld Reverse Engineering. So bietet die Firma beispielsweise verschiedene Geräte zum Digitalisieren, Software zur direkten Abtastdatenverarbeitung und zur Flächenrückführung an.

Das Programm zur Flächenrückführung heißt *scancad geo* und wird für die Betriebssysteme Windows 95 & Windows NT als Version 2.5 angeboten. Es unterstützt die Open GL Grafikbibliothek, die beispielsweise das Arbeiten mit schattierten Flächen beschleunigen kann. Die Software wurde von drei Angestellten der Firma *BCT* entwickelt. Zur Zeit der Diplomarbeit ist ein Entwickler mit der Pflege und Schulung der Software zum Rückführen von Flächen betraut. Die Software bietet nur eine einzige Funktion zum Erstellen von Flächen aus einem Bereich einer Punktwolke.

9.2 Vorgehensweise bei der Flächenrückführung mit *scancad* geo

Die Vorgehensweise mit dem geo-Modulen ist relativ einfach und wie bei *IntiSurf* in verschiedene Einzelschritte unterteilt, vergleiche Abbildung 9-1.

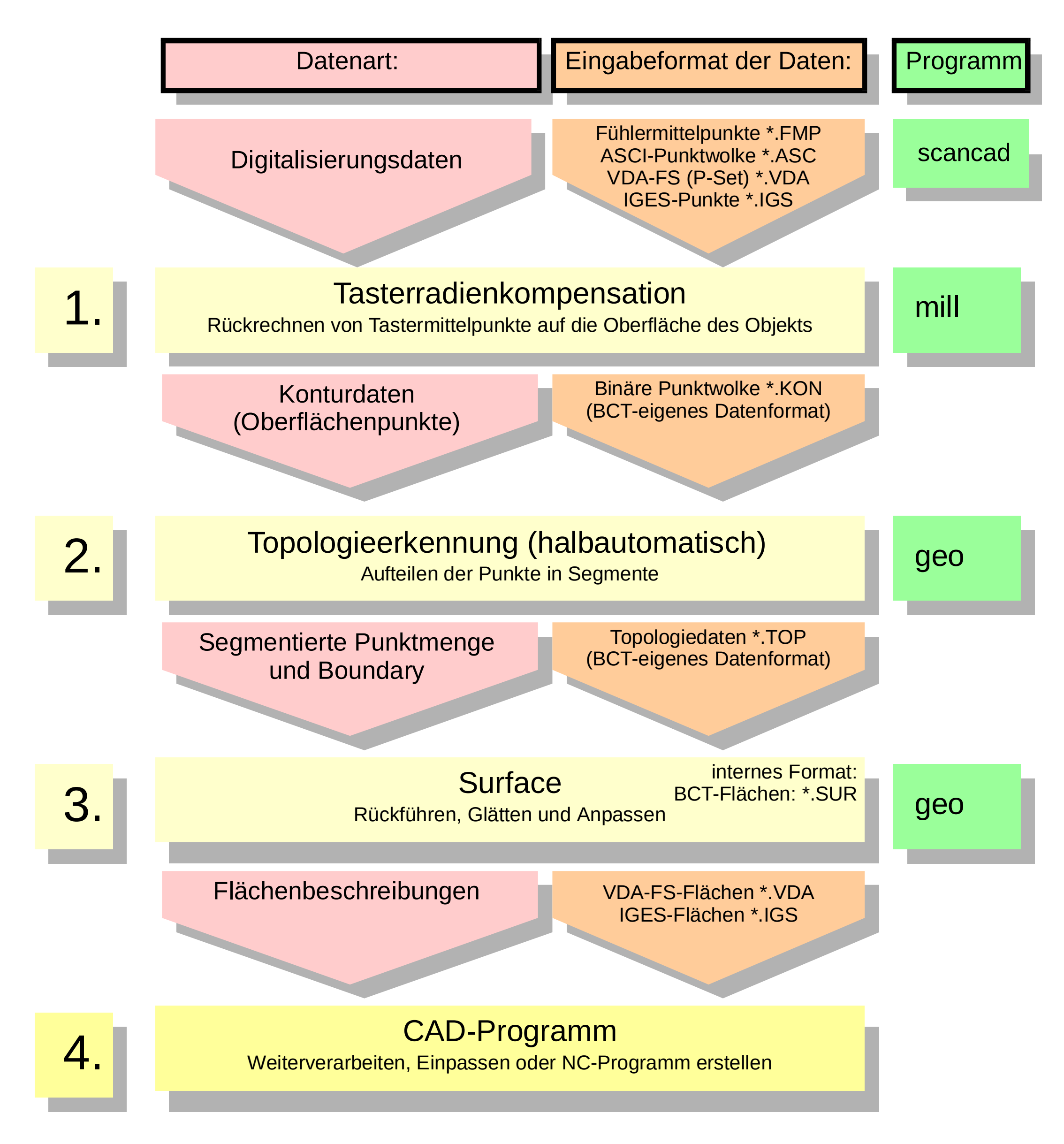


Abbildung 9-1: Vorgehensweise der Flächenrückführung mit *scancad mill/geo*

9.2.1 Tasterradienkompensation

Ein Digitalisiergerät erfaßt üblicherweise Tastermittelpunkte oder Tasterspitzenpunkte. Diese liegen nicht auf der Oberfläche der digitalisierten Geometrie, vergleiche Abbildung 6-4. Die notwendige Rückrechnung auf die Oberfläche des digitalsierten Objekts, wird mit dem Verfahren der Kopierfrässimulation erreicht, vergleiche hierzu Kapitel 6.2.2.

Diese Berechnung wird im Programm: ***scancad mill*** durchgeführt. Das Programmodul ***mill*** wird eigentlich zur Abtastdatenverarbeitung und Fräsprogramm-Generierung auf Punktmengen benutzt. Es wird aber bei jeder Installation von *scancad geo* als eingeschränkte Version mitgeliefert. Das Programm *scancad mill* ist in diesem Fall auf die Funktion zur Tasterradienkompensation eingeschränkt.

9.2.2 Topologieerkennung

Im zweiten Schritt, der Topologiererkennung, soll die Punktmenge in einzelne Untermengen aufgeteilt werden. Hier wird die zugrundeliegende Punktmenge automatisch anhand von

Krümmungswerten auf Kanten und starke Krümmungsänderungen hin untersucht. Dem Benutzer wird ein sinnvoller Vorschlag für eine Segmentierung des Datensatzes in der Punktmenge farblich markiert. Der Benutzer hat nun die Möglichkeit, mittels Identifizieren einzelner Trennlinien Vorschläge zu Segmentgrenzen zu machen. Darüberhinaus besteht die Möglichkeit, mit einer Anzahl halbmanueller Funktionen zusätzliche Segmentgrenzen einzuziehen. Die Topologie-erkennung läuft im Programm: ***scancad geo*** ab.

9.2.3 Surface

Im dritten Schritt, der eigentlichen Flächenrückführung, wird jedes von der Toplologieerkennung zusammengefaßte Punktsegment, je nach Verlauf seiner Berandungskurve durch eine oder mehrere Flächen approximiert. Dazu werden zunächst auf der Randkurve des Segments automatisch Ecken ermittelt. Wenn die automatische Eckpunktsuche weniger als vier Punkte findet, können manuell zusätzliche Eckpunkte einfügt werden. Wenn das Segment mehr als vier Ecken aufweist, muß es durch zusätzliche manuelle Schnitte in mehrere Segmente aufgeteilt werden, bis jedes Segment maximal vier Eckpunkte hat.

Wenn die vier Ecken eines Segments bestimmt sind, folgt der nächste Programmschritt. Die vier Ecken unterteilen die Berandungskurve in vier Teilkurven. Zwischen den gegenüberliegenden Teilkurven spannt das System automatisch ein regelmäßiges, räumliches Netz von Netzlinien auf. Obwohl die Anzahl und Lage der Netzlinien vom System in den meisten Fällen sinnvoll vorge-schlagen wird, stellt *scancad geo* zur Bearbeitung dieser Netzlinien eine mächtige Befehlsmenge zur Verfügung: Löschen, Verschieben, Anpassen und Einfügen. Die zusätzliche Bearbeitung von Linien kann notwendig sein, um eventuell kompliziertere Geometrien mit einer dichteren Anordnung von Flächenpatches genauer zu beschreiben.

Die automatische Verteilung der Netzlinien hängt hauptsächlich von der eingestellten, vom Benutzer geforderten Genauigkeit ab. Ist der Benutzer mit der Struktur des Netzes einverstanden, so wird vom System eine Fläche berechnet, deren Patchstruktur der Maschenstruktur des Netzes entspricht.

Die erstellten Flächen besitzen nach der Berechnung noch keine gemeinsame Randkurve. Für diese Problematik bietet *scancad geo* Funktionen an, die bereits berechneten Flächen zu modifi-zieren. Jede einzelne Fläche kann in sich, entlang einer Patchkurve oder an einem ausgewählten Patchknotenpunkt geglättet werden. Darüberhinaus können Flächen zueinander C0- oder C1-stetig ausgerichtet werden. Nachteilig hierbei ist, daß nur Flächen mit einer zusammenpassenden Aufteilung von Patchlinien ausgerichtet werden können.

9.2.4 Zusammenfassung

Tests haben gezeigt, daß die Güte (Genauigkeit und Glattheit) der rückgeführten Flächen entscheidend von der Topologieerkennung abhängt. Bei der Segmentierung wird über die spätere Aufteilung der Flächen entschieden.

Es sollte daher darauf geachtet werden, daß bereits in der Topologieerkennung sehr sorgfältig vorgegangen wird, da eine schlechte oder ungünstige Aufteilung des Modells später in der Flächengenerierung zu Problemen führen kann, die dort nur schwer oder gar nicht mehr behoben werden können.

9.3 Weitere Informationen zu *scancad geo*

Beim Test der Software *scancad geo* fielen noch einige Dinge auf, die im folgenden kurz erwähnt werden sollen.

9.3.1 Online-Hilfe und Benutzerhandbuch

Die Online-Hilfe ist voll funktionstüchtig, und man findet für jeden Befehl eine ausführliche Erläuterung. Außerdem wird dem Benutzer mit einem kleinen, beschrifteten gelben Fähnchen die nähere Bezeichnung eines Befehls angezeigt, so wie es andere Programme für Windows auch machen.

Das Benutzerhandbuch bietet eine Übersicht über die Vorgehensweise mit *scancad geo* und genaue Erläuterungen zu jedem Befehl. Abgesehen von den grafischen Knöpfen werden keine zusätzlichen Abbildungen verwendet. Das gesamte Benutzerhandbuch für Topologieerkennung und Flächenrückführung ist ausführlich gestalltet.

Aufgrund der Aktualität des Handbuches und der Software, ist zum Zeitpunkt der ersten Analyse der Dokumentation noch kein Inhaltsverzeichnis und kein Index enthalten.

9.3.2 UnDo-Funktion

Die Software *scancad geo* speichert jede Änderung des Stands der Flächenrückführung automatisch als Datei ab. Dadurch ist es möglich, einen Befehl rückgängig zu machen. Hierfür stehen ein UnDo-Icon und ein UnDo-Befehl in einem Pulldown-Menü zur Verfügung.

9.3.3 Berechnungen abbrechen

Alle Vorgänge und Subprozesse innerhalb von *scancad geo* können per Maulklick abgebrochen werden. Dazu zählen alle grafischen Aufbau-Vorgänge, sowie komplexe Berechnungen (wie der Soll-Ist-Vergleich), die längere Zeit in Anspruch nehmen können.

9.3.4 Importschnittstelle für Digitalisierungsdaten

Scancad *geo* bietet drei Standardschnittstellen für Digitalisierungsdaten:

- ASCII-Digitalisierungs-Standard,
- VDA-FS-Punktwolken (P-Set) und
- IGES-Punktmengen.

Zusätzlich kann eine variable Schnittstelle für Punkte frei konfiguriert werden. Die Erfahrung im Umgang mit Punktdaten hat gezeigt, daß kein ASCII-Format dem nächsten gleicht. Manche Digitalisierungs-Standards haben vor den Koordinaten die Achsbezeichnung X,Y und Z. Andere weisen bestimmte Zwischen-Informationen auf, wenn beispielsweise der Taster beim Digitalisieren vom Objekt rückgezogen wurde. Wegen der vielen verschiedenen Beschreibungsmöglichkeiten von Punktdaten, ist eine solche variable Schnittstelle zu begrüßen.

9.3.5 Flächenbeschreibungen

Die Flächenbeschreibung in *scancad geo* erfolgt durch jeweils einen Verband von $m \times n$ rechteckig angeordneten Flächenpatches. Jedes Flächenpatch läßt sich als zweidimensional parametrisiertes Polynom dritten Grades im Raum auffassen.

Bézier-Kurven sind wie B-Splines approximierend, das heißt, die Stützpunkte werden approximierend und nicht interpolierend angegeben. Bézier-Kurven sind eine spezielle Form von B-Splines. Sie haben gegenüber allgemeinen B-Splines aber den Vorteil, daß auf die Stützpunkte direkter zugegriffen werden kann, weil die Parameter des Polynoms eine direkte geometrische Beziehung zur Lage der Stützpunkte haben.

9.3.6 Ausrichten von Flächen zueinander

Das Ausrichten der Flächen zueinander kann auf drei verschiedene Weisen erfolgen. Die Flächen können C0-stetig, geometrisch tangential oder mit einer echten C1-Bedingung ausgerichtet werden.

Ein C0-Übergang schließt, wie in Kapitel 8.2.2 erläutert, nur Lücken zwischen den benachbarten Flächen. Ein tangentialer oder auch knickfreier Übergang kann nur mit einem geometrischen C1- oder einem mathematisch echten C1-Übergang erreicht werden. Ein mathematisch korrekter C1-Übergang zwischen zwei Flächen setzt voraus, daß auch die jeweils benachbarten Patchgrenzen tangentialstetig ineinander übergehen. Diese Bedingung hat zur Prämisse, daß die Patchlinien im selben Punkt enden.

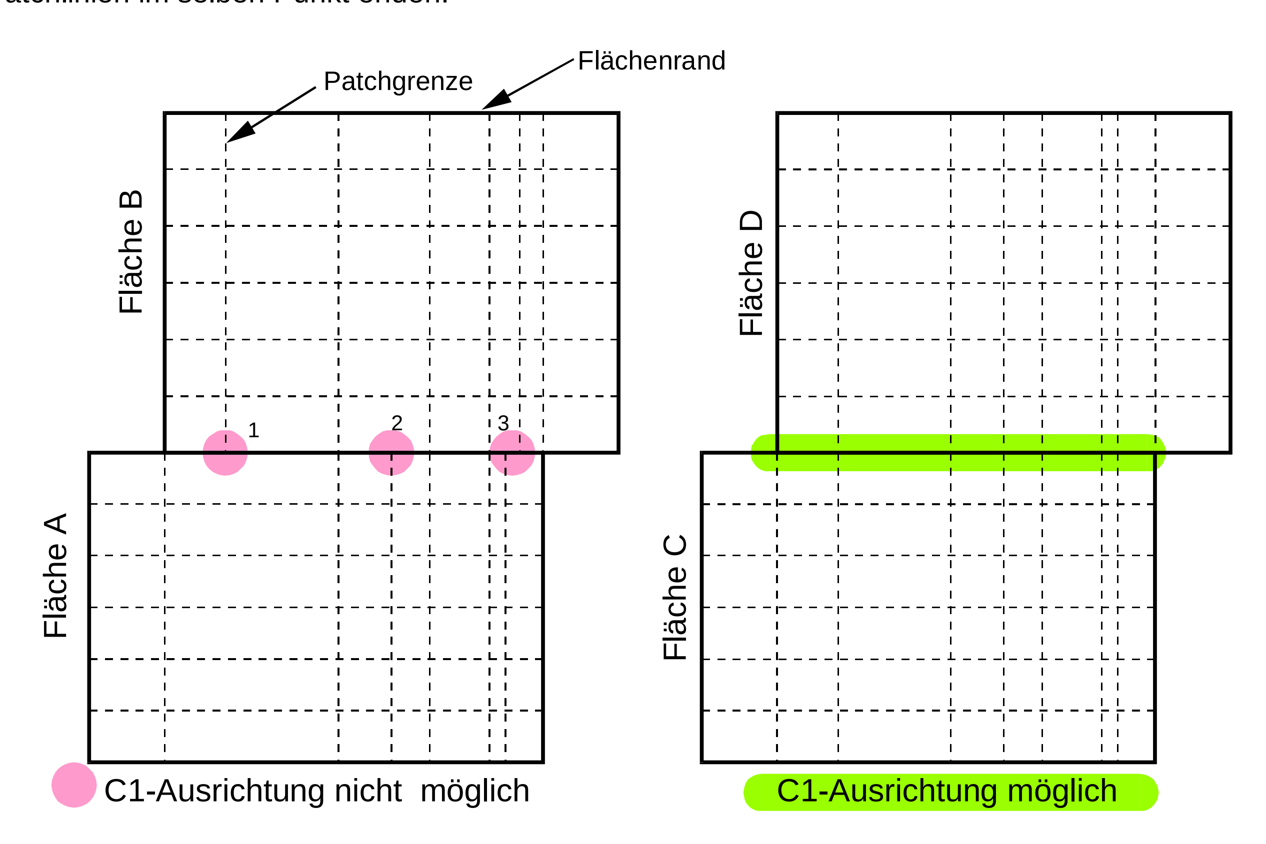


Abbildung 9-2: Bedingungen für C1-Ausrichtung in *scancad* geo

Die Abbildung 9-2 zeigt links ein Beispiel zweier Flächen (A+B), die aufgrund der Lage ihrer Patchlinien nicht mit der Software *scancad geo* tangential ausgerichtet werden können. An den ersten beiden markierten Punkte hat auf einer der beiden Flächen jeweils eine Patchline keine gegenüberliegende Patchlinie. Im dritten Fall liegen die Patchlinien einander nicht genau gegenüber.

In der gleichen Abbildung wird rechts dargestellt, wie der Benutzer sich in einem solchen Fall behelfen kann. Es werden zusätzlich Patchlinien eingefügt, und vorhandene Patchlinien müssen aneinander ausgerichtet werden. Die Flächen müssen aber nicht im ganzen Bereich die gleiche

Randkurve besitzen. Es dürfen an einer Flächenbegrenzung Randbereiche vorkommen, die nicht an die benachbarte Fläche grenzen, wie es in der Abbildung 9-2 rechts gezeigt wird.

9.3.7 Analysefunktion

Der Soll-Ist-Vergleich in der Software *scancad geo* vergleicht einen bestimmten Anteil der Punkte mit der jeweils benachbarten Fläche. Dabei wird, wie im Kapitel 8.2.3 beschrieben wurde, ein Lot zur Fläche gefällt. Da dies nur näherungsweise mit einem iterativen Verfahren bewerkstelligt werden kann, ist dies die zeitintensivste Funktion des Programms. Die Punkte, die außerhalb der vorgegebenen Toleranz liegen, werden markiert. Außerdem wird eine durchschnittliche Abweichung und die maximale Abweichung numerisch angegeben.

Der Benutzer erfährt aber nicht, in welchen Bereichen der Fläche große Abweichungen von der Toleranz aufgetreten sind, und ob die Abweichungen über oder unter den Punkten liegen. Genauere Informationen kann der Benutzer zu jedem einzelnen Punkt bekommen, den er sich manuell selektiert. Solch eine Einzelabfrage ist zwar schnell, bringt aber keine Information über die gesamte Genauigkeit der Fläche.

Eine farbliche Auswertung der automatisch berechneten Genauigkeiten einzelner Punkte wäre von großem Vorteil und sehr benutzerfreundlich, ist aber mit der aktuellen Version noch nicht möglich.

9.4 IntiSurf

9.4.1 Allgemein

Das Programm IntiSurf von der Firma IntiTEC aus Aachen wird seit drei Jahren vertrieben. Zu Beginn der Entwicklung wurden auch PC-fremde Betriebssysteme (HP-UX und IRIX) unterstützt. Die neueste Version ist aber nur noch für Windows NT erhältlich. Es ist unwahrscheinlich, daß die neusten Entwicklungen (neuer als Version 5) für Unix-Plattformen erscheinen.

Die Firma IntiTEC führt Digitalisierung und Flächenrückführung auch in Auftragsarbeit durch. Die Punkte werden von der Firma IntiTEC meist selber taktil mit einer *Cyclone* von der Firma *ReniShaw* (Kapitel 6.2.4) aufgenommen. Dies ist der Grund, warum IntiSurf das Native-Format von „*ReniShaw* Trace“ direkt einlesen kann. Dadurch wird der Umweg über ein großes ASCII-File vermieden.

Die Software liegt seit März 1998 in der Version 6 vor, die jetzt die Open GL Bibliotheksfunktionen für Windows NT unterstützt. Bei der Daimler-Benz AG wird IntiSurf auch von Martin Cyffka im SCG, Werk 010 getestet.

9.4.2 Vorgehensweise mit IntiSurf

Das Erstellen von CAD-Flächenbeschreibungen aus einer Punktwolke ist in verschiedene Schritte unterteilt. Zuerst werden die Punkte im ASCII- oder DMP-Format eingelesen und wenn nötig von Tastermittelpunktskoordinaten auf Oberflächenpunkte umgerechnet. Dabei können die Daten gleichzeitig gefiltert und geglättet werden.

Danach folgt das größte Arbeitspaket, die eigentliche Flächenrückführung. Das heißt, es werden verschiedene Bereiche der Punktwolke mit bestimmten Makrobefehlen und entsprechenden

Parametern zur Flächenrückführung verknüpft. Diese verschiedenen Makrobefehle werden im Kapitel 9.4.3 einzeln erläutert.

Wenn die einzelnen Beschreibungen der Flächen festgelegt und grob erstellt wurden, werden nun die Flächen einzeln oder zusammen noch genauer an die Punktwolke angenähert, um die Genauigkeit zu steigern. Hierzu benutzt man den Befehl ***Analyse***. Dieser Befehl lokalisiert die Stellen auf der Flächenbeschreibung mit einer größeren Abweichung von der Punktwolke und korrigiert gegebenenfalls die Fläche.

Danach werden die Flächenübergänge abgeglichen. Flächenränder werden angewählt und aneinander ausgerichtet und getrimmt. Hierbei hilft eine schattierte Ansicht der Flächen. Kleine Lücken zwischen den Flächen und unstetige Übergänge sind genau zu sehen.

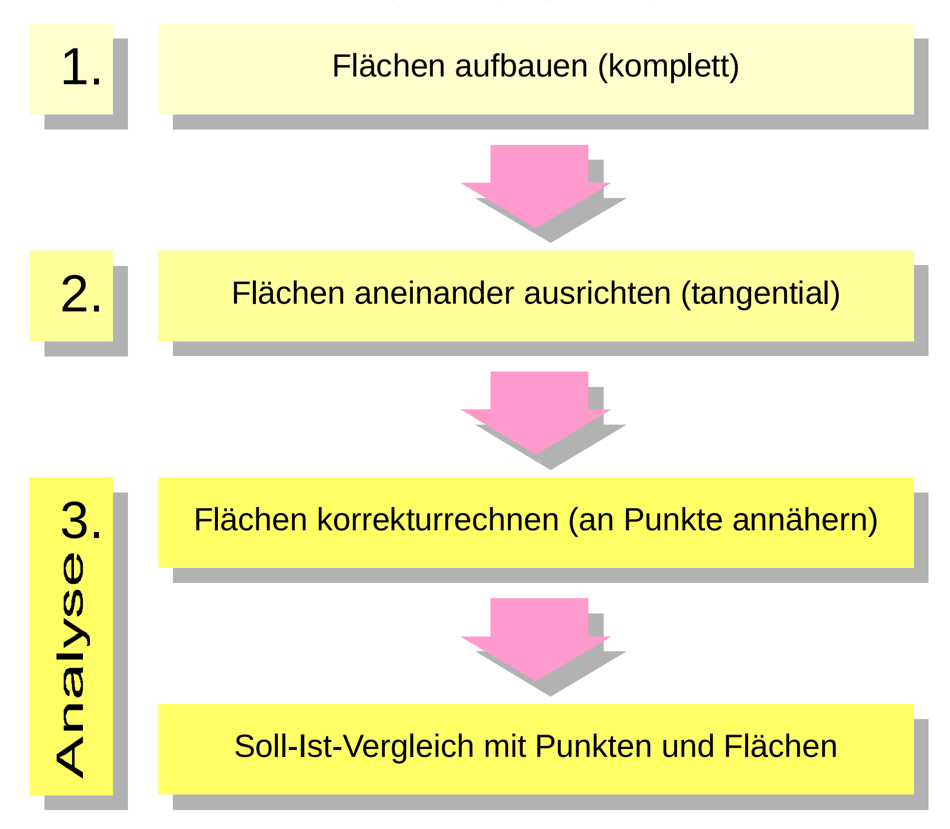


Abbildung 9-3: Vorgehensweise einer Flächenrückführung mit dem Programm IntiSurf

9.4.3 Dokumentation von IntiSurf

Die Dokumentation von IntiSurf ist den vielfältigen Funktionen entsprechend sehr ausführlich. Die Online-Hilfe ist über eine HTML-Beschreibung der Befehle realisiert, die der Software beiliegt. Im umfangreichen Handbuch werden auch viele zusätzliche Tips zur Verwendung der Funktionen und der entsprechenden Vorgehensweise gegeben, so daß man sich jederzeit über die Anwendungsfälle und –art informieren kann.

Die Dokumentation für die neueste Version von IntiSurf V6.0 liegt noch nicht vor.

9.5 Makros (Funktionen) zur Flächenrückführung von IntiSurf

Die Funktionen von IntiSurf zur Flächenrückzuführung sind vielseitig, aber nur mit Übung und Erfahrung anzuwenden. IntiSurf bietet aber keine Möglichkeit, die internen Befehle und Funktionen von außen über eine Programmierschnittstelle anzusteuern. Doch die Auswahl an

Befehlen zum Flächenrückführen ist wesentlich größer als bei ScanCAD GEO. Dadurch wird die Bedienung des Programms aber auch komplizierter.

9.5.1 Allgemeines über Makros

Die Funktionen, bestimmte Objekte (diverse Flächen, Kurven, Geraden und Schnitt) auf die Punktwolke zu projizieren, werden in IntiSurf als Makros bezeichnet. Makros von Kurven und Flächen können über eine Reihe von Funktionen erstellt, bedingt geändert, gelöscht und verschieden dargestellt werden. Sie sind die Grundlage für eine Flächenrückführung mit Hilfe von IntiSurf. In einem Makro werden für einen zuvor definierten Bereich einer vorliegenden Punktwolke alle wesentlichen, charakteristischen Parameter definiert.

Später wird mit diesem Makro die (gewünschte) Oberfläche des definierten Bereiches berechnet. Im weitesten Sinne ist die Erzeugung einer Oberfläche/Kurve eine Abbildung oder Projektion auf die digitalisierte Kontur.

Mit Makros werden die folgende Objekteigenschaften definiert:

- Die Plazierung und Größe eines Bereichs, in dem eine Kurve oder Fläche, auf der Punktdaten abgebildet werden sollen, sowie dessen äußere Gestalt.
- Die Methode, die zur Bildung der Fläche angewandt werden soll.
- Die Art der Fläche (vergleiche Kapitel 9.5.2, 9.5.3 und 9.5.4).

Welche Macros gewählt werden, richtet sich nach der Form und Gestalt der zu berechnenden Fläche (Regelfläche oder Freiformfläche; viereckig, dreieckig oder rund; Radienbereiche und steile Bereiche).

9.5.2 Flächenmakro für Freiformflächenbereiche

Charakteristisch für diese Funktion ist, daß entlang einer Leitkurve ein Makro für einen Flächenbereich erzeugt wird. Begrenzt wird der Flächenbereich in der Länge durch die Leitkurve selbst und in der Breite durch die Angabe der links- und rechtsseitigen Begrenzung der Stützlinien (Breite des Makros). Die Stützlinien zeigen immer senkrecht von der Leitlinie weg. Die Begrenzung der Stützlinien kann nach links und rechts unabhängig voneinander eingestellt werden.

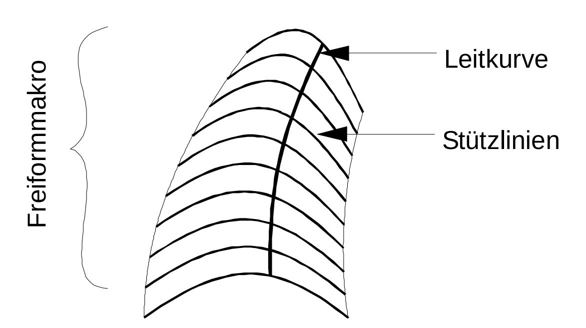


Abbildung 9-4: Freiformmakro mit Leitkurve und Stützlinien

Auch zu einem späteren Zeitpunkt können die maximale Obergrenze und die minimale Untergrenze der Stützkurvenausdehnung in Bezug auf Leitkurve oder Z-Koordinate definiert werden.

9.5.3 Rand-Makro bilden (Flächen aus vier Randkurven)

Mit verschiedenen Makrofunktionen können auf die mit Punkten beschriebene Fläche Kurven und Geraden projiziert werden. Diese können mit dem Rand-Makro zu einer Gruppe von Kurven zusammengefaßt werden, die einen viereckigen Flächenbereich auf den Punkten umschreiben.

Die Funktion wird vor allem bei harmonisch verlaufenden Flächenbereichen und kleineren Flächenzwickeln (Zwischenflächen) verwendet.

9.5.4 Profil-Makro

Mit Hilfe dieser Funktion wird halbautomatisch in einem nur ungefähr vorzugebenden Bereich der Punktwolke ein Radienbereich begrenzt und durch ein solches Radien-Makro beschrieben. Die Funktion bildet an bestimmten Stellen entlang der Leitkurve Stützkurven, die auf die Punktwolke projiziert werden. Die somit gebildeten Konturen werden wie mit der Loft-Funktion aus der CAD-Welt verbunden. Die Lage und Anzahl der Stützkurven an der Leitlinie wird automatisch gesucht und gefunden.

Diese Funktion ist zwar wegen des geringen Aufwandes (Nachzeichnen des Konturverlaufs) sehr komfortabel, benötigt aber zur Berechnung sehr, sehr viel Rechenleistung und Zeit.

9.5.5 Zusätzliche Funktionen mit Flächen- und Kurven-Makros

Einmal gebildete Makros können samt ihrer zusätzlich eingestellten Parameter kopiert, verschoben und gelöscht werden. Außerdem ist für symmetrische Bauteile eine Spiegelungsfunktion vorgesehen.

Die Möglichkeit Makros zu spiegeln, ist in Ihrer Wirkung bei spiegelbildlichen Bauteilen sehr mächtig. Denn bei der Spiegelung werden nicht die Flächen kopiert, sondern nur die Definitionen über Aufbau und Begrenzung der Flächen. Die Flächen selbst werden dann in Abhängigkeit von den überspannten Punkten berechnet.

Eine Funktion, um vollzogene Bearbeitungen rückgängig zu machen (UnDo), fehlt. Im Vergleich: *IntiSurf* speichert wie *scancad geo* auch alle Daten ständig ab, kann aber nicht auf alte Daten zurückgreifen.

9.6 Vergleich zwischen IntiSurf und *scancad* geo

Einige vergleichbare Eigenschaften der beiden bisher beschriebenen Programmen können tabellarisch gegenübergestellt werden:

	IntiSurf	*scancad geo*
Stoppfunktion	funktioniert, aber nicht immer	funktioniert immer
Einlesen von Fremdflächen	möglich	nicht möglich
Anzahl der Ent-wickler des Programms	1	3
Nachträgliche Korrerktur der Patchaufteilung	möglich	möglich (sehr einfach und vielfältig)
Soll-Ist-Vergleich	mit Farbspektrum, aber sehr langsam	dürftige grafische Aufbereitung der Ergebnisse
Flächenbeschreibung	Kubische B-Spline-Flächen	Kubische Beziér-Flächen
Online-Hilfe	Liegt noch nicht vor	sehr gut
Benutzer-Handbuch	Liegt noch nicht vor	gut, aber ohne Inhaltsver-zeichnis und ohne Index

Tabelle 9-1: Tabellarischer Vergleich von *IntiSurf* ⇔ scancad geo

IntiSurf bietet mehr Funktionen zum Flächenrückführen als *scancad* geo, ist aber wegen dieses Vorteils komplizierter zu bedienen als *scancad* geo.

9.7 *Surfacer*

Der *Surfacer* ist ein Produkt der nordamerikanischen Firma *Imageware*. Die Firma wurde 1991 gegründet und hat sich zum Ziel gesetzt, der weltweit führende Hersteller von Reverse-Engineering-Software zu werden.

Surfacer gibt es seit Anfang April 1998 in der Version 8.0 Die Weiterentwicklung geschieht sehr schnell. Die Version 6.0 wurde im Oktober 1996 veröffentlicht, die Version 7.0 kam im März 1997 auf den Markt. An der Entwicklung von *Surfacer* arbeiteten 1997 *ca.* 65 Personen. Vom *Surfacer*-Gesamtpaket gab es 1997 weltweit *ca.* 700 Installationen, wobei diese Zahl laut der Firma *Imageware* sehr schnell ansteigt. Der *Surfacer* bietet über 60 verschiedene direkte oder indirekte Möglichkeiten, aus Punktwolken Flächen zu machen [SiSe96].

Surfacer besitzt zwei freie Programmierschnittstellen, über die neue, selbstprogrammierte Funktionen eingebunden werden können: Die S*urfacer*-eigene SCOLL-Sprache und die Open-*Architecture*-Schnittstelle. Zu der offenen Programmierfähigkeit gehört auch, daß man eigene Macrobefehlsketten in die Menues von *Surfacer* einbauen kann, die dann jeweils ausschließlich oder teilweise auf die vorhandenen Funktionen und Befehle von *Surfacer* zugreifen (ähnlich der IUA-Schnittstelle in *CATIA*). Die Programmierung neuer Funktionen wird im Forschungsbereich (F4T/TM) der Daimler-Benz AG in Ulm intensiv vorangetrieben, getestet und bewertet.

Unter anderem wurde eine Direktschnittstelle für das Punktdatenformat (PGK) von *DigiMan* entwickelt und erfolgreich implementiert. Die Ladezeit von Punktwolken wurde annähernd halbiert und in Zukunft kann damit das speicherintensive ASCII-Format zum Übertragen von Punktwolken umgangen werden. [Glo97]

9.8 Cloud to Geometry (CGO)

Das CAE-System *CATIA* ist eine Entwicklung des Flugzeugherstellers Dassault aus Frankreich und wurde zu Beginn der 80er Jahre speziell zur computerunterstützten Konstruktion im Flugzeugbau entwickelt. [Brog98]

Der Softwarehersteller aus Paris bietet seit der Version 1.7 der Release 4 optional das Modul Cloud to Geometry, kurz CGO an. Dieses Modul wird zur Punktbearbeitung und zur Flächenrückführung verwendet. Das CGO-Modul wurde in Kooperation mit ImageWare entwickelt.[CAT97] Das CGO-Modul ist nur funktionsfähig, wenn schon eine Grundinstallation von *CATIA* existiert.

CATIA besitzt eine Programmierschnittstelle für frei konfigurierbare Befehle. Diese sogenannte IUA-Schnittstelle erlaubt den externen Zugriff auf alle *CATIA*-internen Funktionen, File- und Data-Handlings. Bisher sind die Funktionen des CGO-Moduls von dieser Schnittstelle ausgenommen.

Über die Vorgehensweise der Flächenrückführung in CGO wurde im FT4/TM bereits eine Diplomarbeit verfaßt [Brog98]. Darin findet sich ein „Kochrezept" zur Vorgehensweise der Flächenrückführung mit dem Modul CGO und *Surfacer* 7.0.

9.9 Übersicht

Die Abbildung 9-5 bietet einen tabellarischen Überblick über die im Rahmen dieser analysierten Programme zur Flächenrückführung.

Name des Programms	Name der Firma	Sitz der Firma	aktuelle Version	Zuletzt erschienen	Betriebssysteme
IntiSurf	IntiTEC	Aachen	6.0.0	März 98	Windows NT
scancad geo	*BTC*	Dortmund	2.5	März 98	Windows NT
Surfacer *	*Imageware*	USA	V 8.0	Frühjahr 98	NT + diverse Unix-Syst.
Cloud to Geometry CGO**	Dassault	Frankreich	R4 V1.8	Mitte 97	UNIX (u.A. Irix)

Abbildung 9-5: Software zur Flächenrückführung

* Kosten für Lizenz, Updates und Wartung sind ungewöhnlich hoch

** Nur bei vorhandenem *CATIA*-Grundmodul einsetzbar

9.10 Fazit

Surfacer ist ein Produkt, das hohe Kenntnisse über Flächenmodellierung seitens des Benutzers voraussetzt (high-sophisticated-system). Für Spezialisten in der CAD-mäßigen Oberflächenbearbeitung bietet die Software alles, was benötigt wird, wobei der Schwerpunkt mehr auf dem Produkt-Design liegt als auf der (Re-) Konstruktion von Werkzeuggeometrien. Wegen seiner Vielzahl von Funktionen ist *Surfacer* ein komplexes, hochtechnisiertes und nicht billiges Programm für Anwender, die sich ausschließlich mit der CAD-(RE-)Konstruktion beliebiger Objekte beschäftigen. Wenn eine Planstelle nur für Flächenrückführung vorgesehen ist, kommt *Surfacer* als dazugehörige Software durchaus in Frage.

Im Einsatz von Flächenrückführung in der Produktion ist aber ein einfacheres Programm vorzuziehen. Es sollte eine eingeschränkte Anzahl von Befehlen haben, um nicht zu komplex zu sein. Auch große Punktmengen sollten zügig, genau und in wenigen Schritten in CAD-Beschreibungen umgewandelt werden können. Dabei sollte das Programm schnell sein und stabil laufen. Diese Vorteile bietet *scancad* geo. Im Punkt des Soll-Ist-Vergleichs bestehen bei dieser

Software zwar noch leichte Defizite, doch die vorhandene Funktion des Vergleichs zwischen Punkten und Flächen reicht für eine Beurteilung der Flächengenauigkeit aus.

Die Praxistauglichkeit von IntiSurf ist durch die hohen Anforderungen an die Hardware und die gelegentlichen Abstürze stark eingeschränkt. Hier besteht noch Handlungsbedarf seitens der Entwicklung von IntiTEC, das Programm schneller, sicherer und unkomplizierter zu gestalten.

Bei einer vorhandenen Installation von *CATIA* R4 V1.7 oder höher ist die Verwendung des Moduls CGA (Cloud to Geometry) möglich. Zu bedenken ist allerdings, daß dieses Modul nur auf der CAD-Software *CATIA* aufbaut und viele Funktionen von *CATIA* mitbenutzt werden müssen. Der Benutzer muß demnach immer einige Grundkenntnisse von *CATIA* und der Flächenbearbeitung in *CATIA* mitbringen, um effizient mit dem Flächenrückführungsmodul arbeiten zu können.

Darüberhinaus existieren weitere Produkte auf dem Markt, die Flächen nicht analytisch getrennt nach ihren Eigenschaften interaktiv rückzuführen, sondern fast vollautomatisch in ein schachbrettartiges Geflecht von Freiformflächen umzuwandeln. Mit solchen Flächenbeschreibungen können zwar kaum CAD-Änderungen gemacht werden, aber der große Speicherbedarf von Punktwolken soll durch die ersetzende Flächenbeschreibungen vermieden werden.

10 Zusammenfassung

10.1 Erkenntnisse

Reverse Engineering ist eine zukunftsweisende Technologie. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, daß Reverse Engineering innerhalb der Prozesse der Entwicklung, Konstruktion und Planung viele Anwendungsmöglichkeiten gibt. Die Technologie ermöglicht beziehungsweise verbessert den rückwärts gerichteten Informationsfluß in den Prozeßketten. Beispielsweise kann die Produktionsplanung durch die Anwendung von Reverse Engineering Geometriedaten von Werkzeugen oder Bauteilen aus der Produktion erhalten.

Um Reverse Engineering in die Prozeßkette integrieren zu können, muß in den entsprechenden Abteilungen das Digitalisieren und das Flächenrückführen beherrscht werden. Diese beiden Hilfstechnologien können weiter verbessert werden.

Das Messen mit berührenden Digitalisierungssystemen ist mit Nachteilen behaftet, die sich im wesentlichen aus der Anpreßkraft ergeben. Beim taktilen Erfassen kommt ein Unsicherheisfaktor hinzu, da die Nullgeometrie erst einmal approximativ ermittelt werden muß. Diese Verfahren werden durch die Entwicklung von besseren Rechnern in Zukunft beschleunigt, aber die Genauigkeit ist nur schwer zu optimieren. Taktile Verfahren haben ihre Grenzen in der Genauigkeit und vor allem in der Geschwindigkeit des Digitalisierens. Diese Grenzen lassen sich in Zukunft kaum noch zum Besseren hin verschieben.

Optische Systeme können zwar mehr Punkte in kürzerer Zeit aufnehmen, aber die Digitalisierungsdaten von optischen Geräten müssen nachbearbeitet werden, damit sie zum Flächenrückführen geeignet sind. Das System *Ganymed 97* gepaart mit *DigiMan* zeigt hier einen Weg zu mehr Automatismus. Aber das aktuelle System des *Ganymed* ist auf Karosserievermessung spezialisiert. Aufkleben von Meßpunkten ist beim Digitalisieren von Umformwerkzeugen nicht möglich.

Die Arbeit hat ergeben, daß die Anforderungen an Reverse Engineering stark von den Anwendern abhängen. Für verschiedene Anwendungsfälle wurden mögliche Verfahren aufgezeigt. Um Reverse Engineering auch in der Entwicklung einführen zu können, sollten Reverse-Engineering-Prozeßketten erst in der Instandhaltung und danach in der Konstruktion etabliert werden.

10.2 Ausblick

Die Analyse der zum Reverse Engineering benötigten Technologien Digitalisierung und Flächenrückführung hat ergeben, daß innerhalb der einzelnen Punkte weiterer Innovationsbedarf besteht.

In Zukunft gilt es, einfachere optische Digitalisierungseinheiten zu entwickeln, die in der Genauigkeit um 10 µm liegen und große Flächenbereiche (Bauteile) erfassen können. Die Systeme sollten Ausreißer automatisch filtern, und die Punktdichte muß direkt steuerbar sein.

Flächenrückführung sollte, wie es in *CATIA* schon realisiert ist, ein integriertes Modul einer CAD-Software sein. Damit können unnötige Schnittstellen vermieden werden und die Möglichkeiten des CAD-Programmes in der Flächenbearbeitung gleich mitverwendet werden. Statt zweier

Programme muß dann zusätzlich zum CAD-Programm nur die Flächenrückführungssoftware entwickelt und geschult werden.

Mehr Konvergenz der Programme zur Flächenrückführung wird sich bei einem größeren Angebot auf dem Mark automatisch herausbilden, ähnlich den leistungsfähigen 3D-Feature-Basierten-CAD-Modellierern. Es sollte weniger Spezialsysteme geben, dafür mehr CAD-Systeme, die Module zur Abtastdatenverarbeitung und Flächenrückführung optional anbieten. Solche Allround-Systeme hätten weniger Schnittstellen als die heute verwendeten Spezialsysteme.

11 Literaturverzeichnis

[Abe83] Aberle, W., Brinkmann, B., Müller, H.: Prüfverfahren für Form- und Lageabweichungen, 1. Auflage, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1983

[BeGr97] Beitz, W., Gorte, K.-H.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, Heidelberg, 1997

[Bie97] Bieder, H.: Optische Formerfassung und Reverse Engineering - Anforderungen an die Software, Tagungsband der VDI/DGZfP Fachtagung: Optische Meßtechnik, Langen, 1997

[Brem96] Bremer, Dr. C.: Digitalisierung und Flächenrückführung. VDI-Z, Spezial Werkzeug- und Formenbau (1996) November, S. 36ff

[Brem97] Bremer, Dr. C.: Zurück in die CAD-CAM-Welt. FORM + WERKZEUG (1997) November, S. 57f

[Breu93] Breuckmann, B.: Bildverarbeitung und optische Meßtechnik in der industriellen Praxis, Franzis-Verlag, München, 1993

[Brog98] Broghammer, A.: Entwicklung von Verfahren zur Änderungskonstruktion in *CATIA* anhand optischer Meßdaten; Diplomarbeit bei Daimler-Benz (FT4/TM), Ulm, 1998

[CAT97] IBM-Dassault, *CATIA*-V4 R1.8, OnLine Documentation, 1997

[Czi96] Czichos, H.: Hütte, Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften; 30. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, 1996

[DBL94] Neff, H.: Daimler-Benz-Liefervorschrift 9704; Schnitt-, Zieh-, Stanz- und Preßwerkzeuge, PPA, Stuttgart, 10/1994

[DBN91] Schulz: Daimler-Benz-Norm für *CATIA* (DBN 10008, DBN 10058, DBN 10059; DBN 10103, DBN 10124), Stuttgart, 08/1991

[Dic95] Dicke, H.: Untersuchung von Verfahren zur Aufbereitung von Digitalisierdaten für die Flächenrückführung, Diplomarbeit an der Universität Dortmund, Fachbereich Informatik, durchgeführt am ISF, 1995

[DM98] Martin: Daimler-Benz CAD-Handbuch für produktionsbeschreibende Daten, Daimler-Benz AG, Abteilung EP/QDS, Stuttgart, 1998

[EnFr96] Enselmann, A.; Friedhoff, J.: Digitalisierdatenverarbeitung in einer nutzerorientierten Steuerung. In: Konferenzbericht zum Workshop: Werkstattgerechte Nutzerunterstützung bei der Freiformflächenbearbeitung, Dresden, S. 31-44, 1996

[Erh96] Erhardt, M.: Untersuchung und Abgrenzung von Sensoren zur Flächenrückführung. Diplomarbeit an der Fachhochschule Aalen, Fachbereich Fertigungstechnik, Wintersemester 1995/96

[Fis87] Fischer, H., Grode, H.-P., Harz, G., Noppen, G.: Anwendung der Normen über Form- und Lagetoleranzen in der Praxis, Din-Normenheft 7, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 1987

[Fri96] Tagungsband: Fachgespräche zwischen Industrie und Hochschule Innovative Techniken im Werkzeug-, Formen- und Modellbau, Moderne Verfahren für die Freiformflächenbearbeitung, Institut für Spanende Fertigung, Universität Dortmund, 1996

[Fri96a] Friedhoff, J.: Aufbereitung von 3D-Digitalisierdaten für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau, in [Fri96]

[FrWe96] Joachim Friedhoff und Frank Weller: Flächenrückführung aus berührender Digitalisierung, Vortrag auf der Informatik'96, Workshop Produktmodellierung, Klagenfurt, 24. September 1996

[Glo97] Glocker, W., Optimierung der Flächenrückführung. Unveröffentlichte Diplomarbeit, WS1996/97, Ulm, 1997

[Haa97] Haasis, S.: CAP/CAM-Einsatz im Aggregatebereich der Daimler-Benz AG. Bericht aus der Verfahrensentwicklung 2/97. Daimler-Benz AG: Werk Untertürkheim, 1997

[Kas97] Kaschmieder, D.: CAD-Datenaustausch mit *SWAN*,Vortrag auf dem 3. CAD/CAM Forum, 1997

[Kim87] Kim, H.-S.: Entwicklung eines berührungslosen Tastsystems für den Einsatz an Koordinatenmeßgeräten; Bericht aus dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Springer Verlag, Stuttgart, 1987

[Klei89] Klein, M.: Einführung in die DIN-Normen, B.G. Teubner Stuttgart Beuth Verlag, 1989

[Kra89] Krasznai, A. P.: Die Klotoide in der horizontalen Trassierungslinie, Zürich, 1989

[KrMa97] Kremer, W., Malz, R. W.: Betrachtungen zu Fehlerquellen bei der optischen 3D-Formerfassung, Bildverarbeitung ´97 – Forschen, Entwickeln, Anwenden, TAE-Verlag, Esslingen, 1997

[Lis97] List F. K.: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 5, 3D-Objekterfassung mit Photogrammetrie und Streifenprojektion, Dr. Martin Michaelis, S.167-173, 1997

[Mal97a] Malz, R. W.: Ein neues optisches 3D-Meßsystem für Reverse Engineering, Tagungsbeitrag, Buchs, Schweiz, 1997

[Mal97b] Malz, R. W.: Optische 3D-Meßverfahren und Reverse Engineering in verschiedenen Applikationsfeldern, Bildverarbeitung ´97 – Forschen, Entwickeln, Anwenden, TAE-Verlag, Esslingen, 1997

[Mic97] Michaelis, M.: 3D-Objekterfassung mit Photogrammetrie und Streifenprojektion, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Band 5, S. 167-173, Franz. K. List, 1997.

[Opt98] Intra-Net der Daimler-Benz AG, Gesammelte Informationen über OptoForm, http://intra.daimler-benz.com/zentrale/ft/optoform/startpage/start.htm

[Reim95] Reimpell, J.: Fahrwerktechnik: Grundlagen, 3. Auflage, Würzburg, Vogel, 1995.

[Rich93] Riechmann, W.: Photogrammetrie, in [Breu93], S. 159

[Rot96] Roth-Koch, S.: Flächenrückführung im CAD-Modell unter konstruktiven Randbedingungen, Erfassen und Verarbeiten der Werkstückgeometrie; Fraunhofer IPA-Technologieformum F22, Stuttgart, 1996

[Sax98] Sax-Havel, D.: Erfolgskurs, Zeitung für Mitarbeiter im Werk Untertürkheim, Daimler-Benz AG, Werk Untertürkheim, Ausgabe 18, 1998

[Schr97] Schramm, P.: Datenaustauschvereinbarungen, Vortrag auf dem 3. CAD/CAM Forum, 1997

[SiSe96] Sinha, S., Seneviratne P.: Part to Art, in Hoschek J. / Dankwort, W., Reverse Engineering, B.G. Teubner, Stuttgart, 1996

[Sta96] Stark, M., Flächenrückführung - mehr als nur eine Schnittstelle zwischen Modell und CAD, in [Fri96]

[Swa96] K.A.: *SWAN* – System zum weltweiten Austausch von Nutzdaten; Prospekt von Nov. 1996

[Wei95] Weigert, H.: Vom Designentwurf zum 3D-CAD-Modell, Werkstatt und Betrieb, Carl Hanser Verlag, München, 1995

[Wol88] Wollenberg, R., Fertigung komplexer Werkstücke durch Digitalisierung räumlicher Modelle – Ein Beitrag zu CIM -, Forschungsberichte VDI, Reihe 20, Nr.7, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988

Erschienen in Dieter Roller (Hrsg.), Produktmodellierung. Proceedings-Reihe der Informatik '96, Klagenfurt, 1996.

Anhang A: Tabellarischer Vergleich zwischen *CATIA* CGO und *Surfacer* 7.0

Software:	**Sufacer 7.0**	***CATIA* V4 R1.8 CGO**
Punkte:	Bis ca. 4 Mio. Punkte	Nur bis 1 Mio. Punkte
Macro-Programmierung	Alle Funktionen können über die Programmierschnittstelle von außen angesprochen werden.	*CATIA*-Operationen können über die IUA-Schnittstelle angesprochen werden (Flächenoperationen) Alle Bibliotheksfunktionen von CGO können noch nicht angesteuert werden.
Flächenrückführung mit vier Berandungskurven und der darin enthaltenen Punkte	Diese Funktion ist möglich und bietet darüber hinaus sehr viele Parameter, auf die erstellte Fläche Einfluß zu nehmen. Die erstellte Fläche liegt sehr genau an der Punktwolke Einschränkung: Es müssen immer vier Kurven sein; dies ist aber durch den Algorithmus vorgegeben, mit dem die neue Fläche erzeugt wird. Dreieckige Flächen sind nicht mit den Standardbeschreibungen definierbar. Es muß immer eine viereckige Fläche als Ausgangsmodell erstellt werden, die dann nachträglich getrimmt wird.	Keine Funktion dieser Art vorhanden Für die Flächenerzeugung ist diese Funktion gerade sehr wichtig. (ScanCAD GEO arbeitet ausschließlich mit dieser Funktion)
Einpassen von Meß- und Digitalisierungsdaten in ein CAD-Modell	Mehrere Funktionen zur Einpassung von Meßdaten in ein CAD-Modell sind vorhanden. Gute Funktion.	Keine Funktion vorhanden. In Ulm (FT4/Tm wurde eine solche Funktion u. a. von A. Broghammer programmiert
Projektionsmöglichkeiten	Alle Kurven sind auf Punktwolken projizierbar	3D-Kurven können nicht auf die Punktwolke projiziert werden
Solidmodellierung	nicht möglich	Solidmodellierung von *CATIA* kann mitbenutzt werden und ist beim Rückführen hilfreich
Layer und Filter	Keine Layer und Filtertechnik, dafür aber können Objekte leicht und schnell über die Dialogbox-Identifier angewählt und selektiert werden.	Alle Layer- und Filtertechniken von *CATIA* (sehr gut) Arbeiten mit Punkten im NoShow Bereich möglich
Arbeiten mit den Punkten	Gutes Arbeiten mit der Punktwolke möglich, Punktmengen können einfach unterteilt und wieder zusammengefaßt werden	In manchen Funktionen von *CATIA* ist es notwendig, einzelne Punkte zu selektieren. Eine Umwandlung von der Wolke zu Einzelpunkten ist dafür notwendig
Koordinatensysteme	Nur ein Koordinatensystem möglich	Es kann in mehreren (relativen) Koordinatensystemen gearbeitet werden
Anpassung der Arbeits-Oberfläche	In eine Toolbox können oft benutzte Befehle eingefügt werden	Die Icon-Menueleiste ist frei definierbar und kann mit ausgewählten Befehlen gefüllt werden

Software:	**Sufacer 7.0**	***CATIA* V4 R1.8 CGO**
Regelgeome-trien	Eingeschränkte Möglichkeit von Verwendung von RG	Durch großes CAD-Programm sind alle Möglichkeiten zur Erzeugung und Einbindung von RG möglich
Übersicht	Der ungeübte Anwender kann den *Surfacer* leicht erlernen, wegen der klaren Struktur der Befehle	*CATIA* ist aufwendiges CAD-Pro-gramm. Neue Benutzer müssen sich immer erst mit dem gesamten Wasser-kopf zurechtfinden. Dann kann man erst Flächenrückführung betreiben.
2D-Konstruktion	Kein direktes und einfaches Arbeiten in einer 2D-Ebene möglich	Auch das Konstruieren im 2D möglich (*CATIA* 2D)
Export	Exportieren von rückgeführten Flächen war bisher ohne Probleme (IGES und VDA FS)	Beim Exportieren werden getrimmte Flächen und Flächennormale oft falsch übertragen.

Tabelle 11-1: Forschungsstandorte mit einem Schwerpunkt auf Reverse Engineering

Quelle: Diplomarbeit v. Axel Broghammer [Brog98] (Seite 29ff.)

Anhang B: Forschung im Bereich Reverse Engineering

Reverse Engineering ist zu einer der vielversprechendsten Technologien geworden. Daß die Zahl der Hochschulen ansteigt, die auf diesem Gebiet Forschung und Entwicklung betreiben, belegt dies.

Das größte Anwendungsfeld von Reverse Engineering befindet sich in der Informatik. In der Herstellung von komplexen Softwareprodukten werden die fertigen und angepaßten Codes aus der Maschinensprache zurück übersetzt, die Software wird durch eine Disassemblierung wieder in eine Klartextsprache überführt. Aufgrund dieser Ergebnisse kann das Produkt dann weiterentwikkelt werden, wobei automatisch alle Anpassungen, die nicht im Quellcode standen, berücksichtigt werden. Solche Anpassungen, die nicht selten nach der eigentlichen Relaise stattfinden, werden über externe Bibliotheken oder durch sogenannte Patches durchgeführt. Patches sind kleine ausführbare Dateien, die gezielt Änderungen am fertigen Programm durchführen.

Institute an Hochschulen, die sich mit Flächenrückführung (engl. surface reconstruction) beschäftigen:

Lehstuhl / Institut	**Hochschule**	**WWW-Adresse**
Lehrstuhl für Rechneranwendung in der Konstruktion (RKK)	Universität Kaiserslautern	http://rkk.mv.uni-kl.de/
Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (ipa)	Fraunhofer-Gesellschaft* (Stuttgart)	http://www.ipa.fhg.de/ IPA_HomePage.html
ISF Institut für Spanende Fertigung	Universität Dortmund	http://www-isf.maschinenbau.uni-dortmund.de/index.html
Informatik VII	Universität Dortmund	http://ls7-www.informatik.uni-dortmund.de/
Institut für Maschinenkonstruktion: Konstruktionstechnik	Universität Magdeburg	http://www.ttz.uni-magdeburg.de/ttz/forschung/i567.htm
Institut für Angewandte Informatik Abt. Industrielle Handhabungssysteme (IS)	Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)	http://www.pomos.fzk.de/Pomos/

Abbildung 11-1:Forschungsstandorte mit Schwerpunkt auf Reverse Engineering

* Fraunhofer ist eine Organisation für angewandte Forschung in Deutschland

Anhang C: Abbildungsverzeichnis

Anhang D: Funktionsprinzipien optischer Digitalisierverfahren

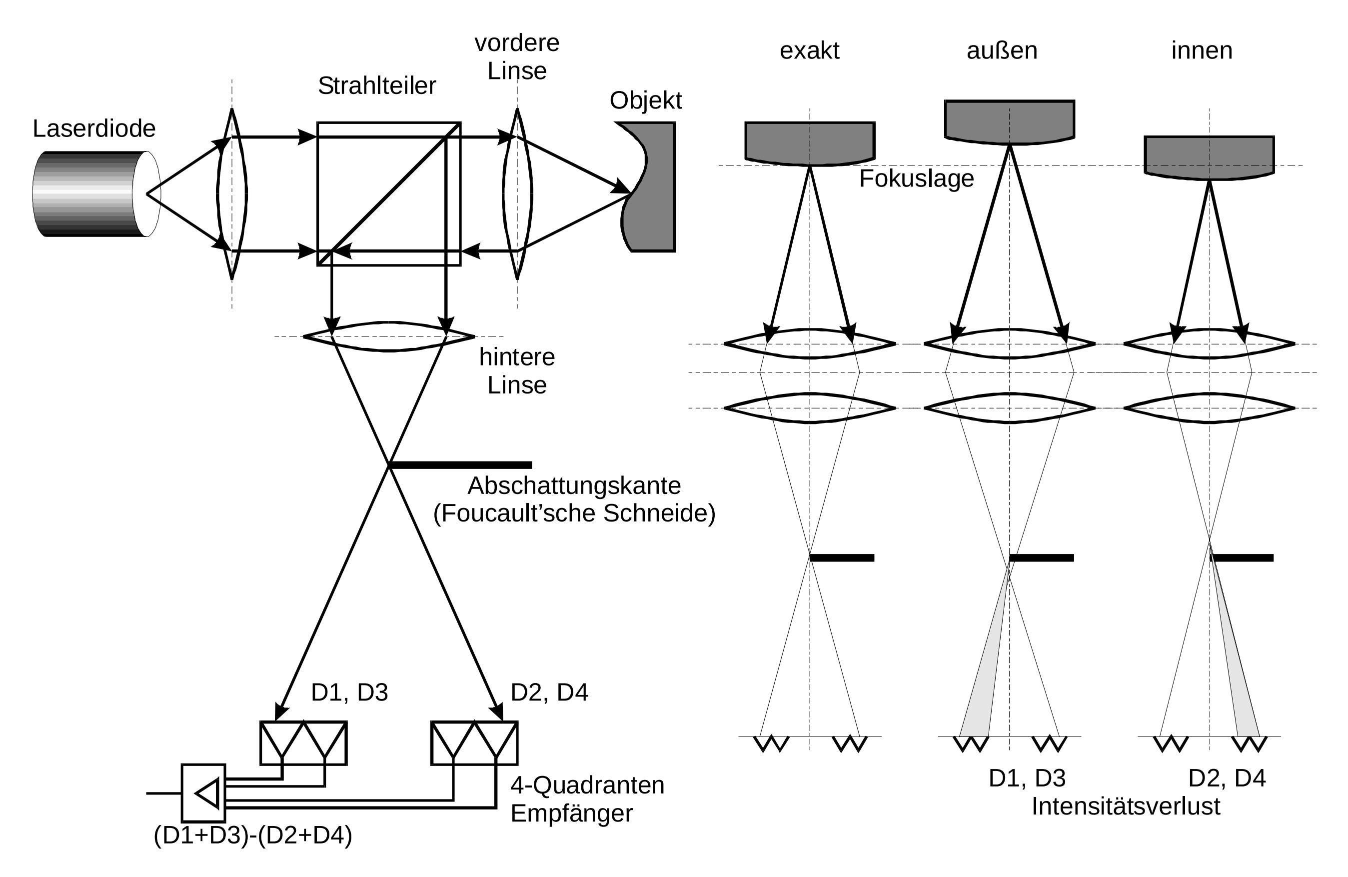


Abbildung 11-2: Wirkprinzip des Laser-Fokusierverfahrens

Dokumentinformation

Die Diplomarbeit ist insgesamt 110 Seiten lang und enthält 26.266 Wörter. Die Arbeit hat 180.062 Zeichen (ohne Leerzeichen) und belegt als Word 7.0 Dokument insgesamt 1198 kB auf dem Datenträger.